



**UNIVERSITÉ DE FRIBOURG**  
**UNIVERSITÄT FREIBURG**

SCIENCES DU MOUVEMENT ET DU SPORT  
BEWEGUNGS- UND SPORTWISSENSCHAFTEN

# **Einfluss von kinetischen, kinematischen und anthropometrischen Parametern auf die Sprunghöhe bei einem Countermovement Jump**

Abschlussarbeit zur Erlangung des  
Master of Science in Sportwissenschaften  
Option Unterricht

eingereicht von

**Cosima Wieland**

an der  
Universität Freiburg, Schweiz  
Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät  
Departement für Medizin

in Zusammenarbeit mit der  
Eidgenössischen Hochschule für Sport Magglingen

Referent  
Prof. Dr. Wolfgang Taube

Betreuer  
Jan Ruffieux

Freiburg, Oktober 2017

## **Inhaltsverzeichnis**

Zusammenfassung.....	3
1 Einleitung.....	4
1.1 Countermovement Jump .....	5
1.2 Mechanik.....	6
1.3 Anthropometrie .....	9
1.4 Leistungsbestimmende Parameter des CMJ .....	9
1.5 Ziel der Arbeit.....	15
2 Methode .....	17
2.1 Stichprobe .....	17
2.2 Design der Studie.....	17
2.3 Untersuchungsmethoden und -instrumente.....	19
2.4 Auswertung und statistische Analyse der Daten.....	19
3 Resultate.....	21
3.1 Interindividuell.....	21
3.2 Intraindividuell.....	39
4 Diskussion.....	44
4.1 Interindividuell.....	44
4.2 Intraindividuell.....	51
4.3 Fazit und Ausblick auf mögliche weiterführende Fragestellungen .....	52
5 Schlussfolgerung.....	53
Literatur.....	55

## **Zusammenfassung**

Es gibt bereits einige Studien, die sich mit dem Einfluss von kinetischen, kinematischen und anthropometrischen Parametern auf die Sprungleistung bei einem Countermovement Jump (CMJ) beschäftigten. Die Mehrheit der Studien befasste sich dabei mit Querschnittsanalysen. Mit dieser Studie wollte ich die inter- und intraindividuellen Leistungsunterschiede beim CMJ mit Armschwung in Bezug auf kinetische, kinematische und anthropometrische Parameter sowohl vor wie auch nach einer Trainingsintervention (6 Trainings) untersuchen. Der CMJ von 32 Probanden (Geschlecht: m = 18, w = 14; Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung: Alter  $22 \pm 4$ , Körpergrösse  $177.5 \pm 8.5$  cm, Gewicht  $71.7 \pm 9.0$  kg) wurde dabei analysiert. Die Korrelationen der Parameter mit der Sprunghöhe und untereinander wurden in einer Pre-, Post-, und Pre-to-Post-Analyse (Korrelationen mit Sprunghöhenveränderung) untersucht. Die 32 Probanden konnten die Sprunghöhe durch das Techniktraining im Schnitt um  $2.7 \pm 3.1$  cm (5.1 %) verbessern. In der Pre-to-Post-Analyse konnte nur die Grössenveränderung der Abfluggeschwindigkeit der Hüfte einen signifikanten Zusammenhang mit der Sprunghöhenveränderung aufweisen. 5 Parameter, die in der Pre-Analyse eine signifikante Korrelation mit der Sprunghöhe aufwiesen, konnten in der Post-Analyse nicht identifiziert werden und umgekehrt 7. Eine Querschnittsanalyse reicht somit nicht aus, um alle leistungsbestimmenden Parameter zu identifizieren. Die Parameter Segmentlängen des Unterschenkels, des Rumpfes und des Unterarmes, Gewicht, Körpergrösse, maximaler (relativer, exzentrischer und konzentrischer) Kraftwert, Anfangskraft, Abfluggeschwindigkeit und maximale Geschwindigkeit des KSP, maximaler (relativer) Leistungswert, maximale positive Geschwindigkeit und Abfluggeschwindigkeit der Hüfte sowie maximale konzentrische Winkelgeschwindigkeit des Fusses, des Knies und der Hüfte zeigten sowohl in der Pre- wie auch in der Post-Analyse signifikante positive Korrelationen mit der Sprunghöhe auf. Der maximale relative Leistungswert wurde dabei als bester Einzelprädiktor der Sprunghöhe identifiziert. Nur der maximale relative Kraftwert (PRE) und der maximale relative Leistungswert (PRE und POST) konnten sowohl bei den Frauen wie auch bei den Männern eine signifikante Korrelation mit der Sprunghöhe aufweisen. Dies zeigt, dass sich die zwischen den Geschlechtern auf die Sprunghöhe beeinflussenden Parameter unterscheiden. Die intraindividuelle Analyse ergab zusätzlich, dass keine Universalparameter, die bei allen Probanden eine gute Korrelation mit der Sprunghöhe aufzeigten, gefunden werden konnten. Für Trainer ist es somit wichtig, ihre Athleten individuell mit unterschiedlichen Trainingsschwerpunkten zu trainieren, um bei allen eine maximale Sprunghöhenverbesserung zu erzielen.

## 1 Einleitung

Das Springen ist eine wichtige Form der menschlichen Bewegung. Die Leistung in unterschiedlichen Sprüngen ist in vielen Sportarten bedeutend für den Erfolg. Die Sprungleistung spielt ausserdem eine wichtige Rolle beim Prüfen und Überwachen von physischen Fähigkeiten eines Athleten sowohl im Sport- wie auch im Medizinbereich (Ugarkovic, Matavulj, Kukulj & Jaric, 2002). Für den Sport dient die Beurteilung der Kraftqualitäten eines Athleten zum einen dazu, dass der Trainer ein Athletenprofil erstellen und die Stärken und Schwächen identifizieren kann und zum anderen, um den Trainingsprozess überwachen und steuern zu können. Vertikale Sprungtests dienen vor allem zur Leistungsbestimmung von explosiven Eigenschaften, wobei es unterschiedliche Feld- und Labortests gibt (Young, 1995).

Anfang der 80er Jahre wurde mit Hilfe der Arbeiten von Asmussen und Bonde-Petersen (1974), Komi und Bosco (1978) und Kuhlow (1980) ein Standardsprungkrafttest entwickelt. Dieser Test besteht aus drei vertikalen Standard-Sprungformen: dem Drop Jump, dem Squat Jump und dem Countermovement Jump (CMJ). Bei allen drei Sprungtests liefert die Körperschwerpunkterhöhung während der Flugphase das Kriterium für die erreichte Sprungleistung (Frick, Schmidtbleicher & Wörn, 1991). Die Messung der Körperschwerpunkterhöhung kann mit verschiedenen biomechanischen Messverfahren erfolgen, wie Kontaktmatten (Dias et al., 2011; Kenny, O. Caireallain & Comyns, 2012), Kraftmessplatten (Dias et al., 2011; Rogan, Radlinger, Imhasly, Kneubuehler & Hilfiker, 2015), Infrarotplattformen (Bosquet, Berryman & Dupuy, 2009), Accelerometer (Casartelli, Muller & Maffiuletti, 2010) und High-speed-Kameras (Garcia-Lopez et al., 2005) («Countermovement Jump (CMJ)», o.D.). Unter diesen Messmethoden wird die Kraftmessplatte oft als Referenzmethode angesehen, da sie bei der Messung von Sprungzeit und Kraftparametern nur kleine Fehler aufweist (Garcia-Lopez et al., 2005).

In vielen Studien werden unterschiedliche Zusammenhänge zwischen der Leistung in vertikalen Sprungtests und anderen explosiven Bewegungen dargelegt (Sole, 2015). Diverse Studien zeigten, dass die vertikale Sprunghöhe bei unterschiedlichen Sprungtests mit der Sprintleistung (Berthoin, Dupont, Mary & Gerbeaux, 2001; Bissas & Havenetidis, 2008; Bret, Rahmani, Dufour, Messonnier & Lacour, 2002) und richtungswechselnden Aufgaben zusammenhängen (Barnes et al., 2007; Peterson, Alvar & Rhea, 2006). Ausserdem konnten Studien darlegen, dass es eine Beziehung zwischen der vertikalen Sprungleistung und den spezifischen Sportdisziplinen, wie Sprint-Radfahren (Stone et al., 2004) und dem olympischen Gewichtheben (Carlock et al., 2004; Fry et al., 2006; Vizcaya, Viana, del Olmo & Acero 2009) gibt.

## **1.1 Countermovement Jump**

In einer Studie von Markovic, Dizdar, Jukic und Cardinale (2004) wurde festgestellt, dass der CMJ eine valide und reliable Messmethode ist, um die Explosivkraft in den unteren Extremitäten zu messen. Zusätzlich ist er der am besten geeignete und am häufigsten eingesetzte Sprungtest, da er koordinativ-technisch am wenigsten Anforderungen an die Probanden stellt (Wank & Heger, 2009). Bei einem CMJ startet der Springer in einer aufrechten Position. Der Sprung wird mit einer Gegenbewegung nach unten eingeleitet, wobei die Hüft-, Knie- und Fussgelenke gebeugt werden. Der Körperschwerpunkt (KSP) wird gesenkt, währenddessen der Oberkörper immer aufrecht gehalten werden sollte. Darauf folgt eine schnelle und maximale Streckung der Knie-, Hüft- und Fussgelenke (Wirth, Sander, Keiner & Schmidtbleicher, 2012).

Durch die Ausholbewegung werden die Muskeln zuerst gedehnt (exzentrische Kontraktion), gefolgt von einer Verkürzung (konzentrische Kontraktion). Diese Kontraktionsform wird als Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus bezeichnet (Ishikawa & Komi, 2008).

Aus der Literatur ist bekannt, dass die Sprunghöhe bei einem CMJ grösser ist, als bei einem Squat Jump (Bobbert & Casius, 2005; Bobbert, Gerritsen, Litjens & Van Soest, 1996; Komi & Bosco, 1978; McGuigan et al., 2006). Dies wird dadurch begründet, dass der CMJ einen Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus aufweist und der Squat Jump nur aus einer konzentrischen Phase besteht. Zu einem der möglichen Vorteile eines durch einen Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus charakterisierten Sprunges gehört die Tatsache, dass eine Muskeldehnung vor der konzentrischen Phase Zeit für die Erreichung der maximalen, muskulären Rekrutierung ermöglicht. Dies führt zu Beginn der konzentrischen Phase zu grösseren Kräften, im Vergleich zu Kontraktionen, die aus der Ruhe beginnen. Eine maximale, freiwillige Muskelkontraktion braucht Zeit, bis die Muskelkraft einen Maximalwert erreicht hat (Chapman, Caldwell & Selbie, 1985; Van Ingen Schenau, 1984).

Eine weitere Erklärung betrifft die Lagerung und Wiederverwendung von elastischer Energie. Die Idee dabei ist, dass während der Gegenbewegung im CMJ die aktiven Muskeln vorge-streckt und Energie absorbiert werden, von denen ein Teil vorübergehend in elastischen Elementen gelagert und später in der konzentrischen Phase wiederverwendet werden können. Dies sollte dazu beitragen, die produzierte Arbeit zu erhöhen (Asmussen & Bonde-Petersen, 1974; Komi & Bosco, 1978).

Durch die Muskeldehnung, die während der Gegenbewegung im CMJ auftritt, werden spinale Reflexantworten ausgelöst, die dazu beitragen, die Muskelstimulation während der konzentrischen Phase auf ein höheres Level als bei einem Squat Jump zu bringen. Dadurch können die

Muskeln eine grössere Kraft erzeugen und damit mehr Arbeit bei der Aufwärtsbewegung produzieren (Dietz, Schmidtbleicher & Noth, 1979; Bobbert et al., 1996).

Der CMJ kann sowohl mit einem Armschwung als auch ohne durchgeführt werden. Viele Studien zeigten, dass die Sprungleistung mit einem Armschwung um 10 % oder mehr verbessert wurde (Cheng, Wang, Chen, Wu & Chiu, 2008; Feltner, Frascetti & Crisp, 1999; Harman, Rosenstein, Frykman & Rosenstein, 1990; Shetty & Etnyre, 1989). Der CMJ mit Armschwung ist für die meisten Sportler natürlicher, weil in vielen Sportarten die Arme mitverwendet werden. Jedoch bietet der CMJ ohne Armschwung den Vorteil, eine exaktere Aussage über die Leistungsfähigkeit der unteren Extremitäten machen zu können (Wirth et al., 2012).

## **1.2 Mechanik**

Die Mechanik beschreibt die Zusammenhänge der Ursachen und Wirkungen von Bewegungen. Eine Bewegung eines Punktes oder eines Körpers ist dessen Ortsveränderung während einer bestimmten Zeitdauer. Diese ist nur dann eindeutig feststellbar, wenn ein Vergleich zu einem zweiten Körper durchgeführt wird. Damit sportliche Leistungen in den unterschiedlichen Sportarten bestimmt werden können, muss ein Bezugssystem hergestellt werden. Dabei werden der Beginn, die Richtung und das Ende der Bewegung festgelegt. Für die physikalisch-mechanische Bestimmung von Bewegungen, Körpern und Teilkörpern wird in der Sportwissenschaft meist das dreidimensionale kartesische Koordinatensystem verwendet, welches aus drei senkrecht aufeinander stehenden Achsen (x-, y- und z-Achse), den sogenannten Koordinatenachsen, besteht. Den Bezugspunkt (0,0,0) bildet dabei der Schnittpunkt dieser drei Achsen.

Die Mechanik lässt sich in die zwei Teilbereiche Kinematik und Dynamik unterteilen. Um die kausalen und quantitativen Zusammenhänge zwischen der Kinematik und der Dynamik beschreiben zu können, eignen sich die Newton'schen Gesetze. Das erste Gesetz ist das Trägheitsgesetz, welches besagt, dass ein Körper im Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen geradlinigen Bewegung verharrt, solange keine Kraft auf den Körper einwirkt und den Bewegungszustand ändert. Das Zweite ist das Aktionsgesetz, welches auch als Grundgesetz der Mechanik oder dynamisches Grundgesetz verstanden wird. Es beschreibt den Zusammenhang und die Abhängigkeit zwischen den mechanischen Grössen Kraft, Masse und Beschleunigung. Wird eine Bewegung einer Masse geändert, so ist diese zur Einwirkung der bewegendes Kraft proportional und verläuft längs der Wirkungsrichtung dieser Kraft. Beim Dritten handelt es sich um das Reaktionsgesetz, welches erklärt, dass die Kräfte immer paarweise

auftreten. Wird also eine Kraft vom Körper A auf den anderen Körper B ausgeübt (actio), so wirkt eine gleich grosse Kraft von Körper B in entgegengesetzter Richtung auf Körper A (reactio; Schwameder, Alt, Gollhofer & Stein 2013; Wick, 2005).

**1.2.1 Kinematik.** Die Kinematik beschreibt eine räumlich-zeitliche Ausprägung von Bewegungen ohne Berücksichtigung der Bewegungsursache. Durch das Festlegen eines Bezugssystems, wie dem kartesischen Koordinatensystem, lassen sich die Lage eines Punktes, Objektes, Körpers oder Teilkörpers im Raum definieren. Somit können in einem definierten Zeitpunkt der Bewegung die Entfernung zum Bezugspunkt gemessen werden sowie die Veränderung der Lage in Richtung und Betrag. Zusätzlich zu einer Beschreibung der Bewegung in Bezug auf den Raum kann eine zeitliche Zuordnung beschrieben werden, welche die zweite bedeutende kinematische Bezugsgrösse darstellt. Die Kinematik unterteilt die Bewegungsformen bezüglich des geometrischen Aspektes in die zwei Bewegungsformen Translation (Bewegungen bei denen alle Punkte des Körpers auf geradlinigen oder gekrümmten Bahnen in der gleichen Zeit denselben Weg zurücklegen) und Rotation (Bewegungen, bei denen alle Punkte des Körpers in der gleichen Zeit denselben Winkel einnehmen). Hinsichtlich des zeitlichen Aspektes werden die Bewegungsformen als gleichförmige (konstante Geschwindigkeiten ohne Beschleunigung) und ungleichförmige Bewegungsarten (Geschwindigkeitsänderungen) unterschieden.

Zu den grundlegenden kinematischen Parametern gehören die Zeit  $t$  [s], die Länge  $s$  [m], der Weg  $s$  [m], der Winkel  $\varphi$  [°], die Geschwindigkeit  $v$  [m/s], die Beschleunigung  $a$  ( $\text{m/s}^2$ ), die Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  [°/s] und die –beschleunigung  $\alpha$  [°/s<sup>2</sup>] (Schwameder et al., 2013; Wick, 2005).

Die Zeit stellt die Abfolge von Ereignissen dar. Der Weg dient zur Beschreibung von translatorischen Bewegungen. Sie kann die Richtung und Entfernung von einem Punkt zu unterschiedlichen Zeitpunkten darlegen wie auch zwischen zwei Punkten zur selben Zeit. Der Winkel dient zur Bewegungsbeschreibung von rotatorischen Bewegungen und zeigt das Verhältnis zwischen zweier Längen auf. Als Geschwindigkeit wird die Ortsveränderung eines Punktes oder Körpers über die Zeit verstanden. Beschleunigung ist die erste Ableitung der Geschwindigkeit nach der Zeit und die zweite Ableitung des Wegs nach der Zeit. Sie illustriert die zeitliche Veränderung der Geschwindigkeit (Schwameder et al., 2013).

**1.2.2 Dynamik.** Die Dynamik beschreibt die auf ein System wirkenden Kräfte und erklärt die Ursachen und Mechanismen, welche zur Bewegung von Körpern führt. Sie beinhaltet sowohl

die Kinetik, bei der es sich um Kraftwirkungen in bewegten Systemen handelt, als auch die Statik, die die Kraftwirkungen in ruhenden Systemen beschreibt. Die Kräfte können von innerem oder äusserem Ursprung sein. Die internen Kräfte, welche als Zug-, Kompressions-, Scher- und Torsionskräfte innerhalb des Körpers wirken, kommen von der Muskelaktivität, der Bänder und der Spannung in den Muskeln und Gelenken. Die externen Kräfte beinhalten die Schwerkraft (Gewichtskraft von Mensch und ggf. Geräten), Trägheitskräfte (z.B. Gegner, Sportgeräte), Reibungskräfte (z.B. zwischen Schuh und Untergrund), Widerstandskräfte (z.B. Luftwiderstand, Wasserwiderstand), Zentripetalkräfte bei Rotationsbewegungen (z.B. Hammerwurf) und Reaktionskräfte (z.B. Bodenreaktionskraft). Die Basisgrößen der Dynamik sind die Masse und die Kraft, die mit der Beschleunigung in Verbindung stehen (Schwameder et al., 2013).

Das Messen der während einem CMJ wirkenden Kräfte kann mittels Kraftmessplatte geschehen. Dabei misst die Plattform sowohl die Kraft, die durch das Subjekt auf die Platte wirkt, wie auch die Kraft, die von der Platte auf das Subjekt ausgeübt wird. Die von der Platte auf den Körper wirkende Kraft wird als Bodenreaktionskraft bezeichnet (Linthorne, 2001).

Das Darstellen der produzierten Kraft in Bezug auf die Zeit resultiert in einer F-t-Kurve (siehe Abbildung 1; Sole, 2015).

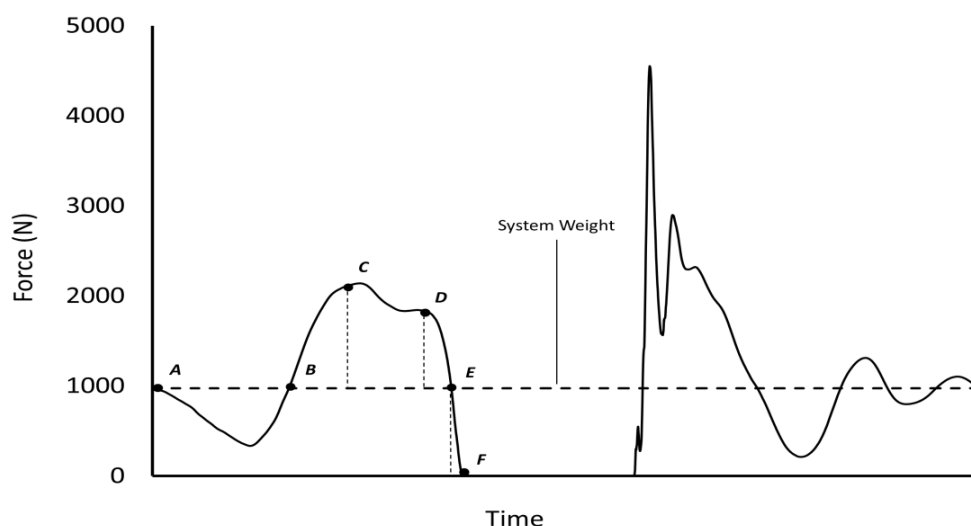


Abbildung 1. Die F-t-Kurve eines Countermovement Jumps (CMJ). A = Einleitung der ungewichteten Phase. B = Zeitpunkt, an dem die Bodenreaktionskraft auf das Systemgewicht zurückkehrt. C = Ende der exzentrischen Phase und die Initiation der Vortriebsphase sowie die maximale negative Körperschwerpunktverschiebung und der Zeitpunkt, zu dem die Körperschwerpunktgeschwindigkeit von negativ nach positiv übergeht. D = Maximale Geschwindigkeit des Körperschwerpunktes. E = Die vertikale Bodenreaktionskraft fällt unter das Systemgewicht. F = Absprung. (Sole, 2015, S. 27)



Aus dieser F-t-Kurve können Zeit- und Kraftvariablen direkt extrahiert werden sowie Variablen, die beide Komponenten miteinander verbinden (Laffaye, Wagner & Tombleson, 2014). Zu den wesentlichen dynamischen Parametern gehören die Masse  $m$  [kg], die Kraft  $F$  [N] (Newton), das Drehmoment  $M$  [Nm], der Impuls  $p$  [kgm/s], das Trägheitsmoment  $J$  [kgm<sup>2</sup>], die Arbeit  $W$  [Nm] und die Leistung  $P$  [W] (Watt).

Die Masse beschreibt die Trägheit eines Körpers bei translatorischen Bewegungen. Die Kraft kann als Vektor dargestellt werden und wird durch den Betrag (Länge des Vektors), die Richtung (Richtungsvektor) und die Orientierung (Spitze des Vektors) beschrieben. Sie verändert den Bewegungszustand eines Körpers bei translatorischen Bewegungen. Dies kann sowohl in Form von Beschleunigung (Kinetik) und in Form von Deformation (Statik) geschehen. Das Drehmoment kommt bei einer Rotation zum Vorschein. Greift eine Kraft einen Körper nicht durch den Drehpunkt an, so kommt es zur Entstehung eines Drehmomentes. Beim Impuls (Produkt aus Masse und Geschwindigkeit) spielt der Erhaltungssatz eine wichtige Rolle. Er besagt, dass der Gesamtimpuls in einem abgeschlossenen System konstant bleibt. Das Trägheitsmoment bezeichnet die Trägheit eines Körpers bei rotatorischen Bewegungen. Als Arbeit wird das Skalarprodukt der Vektoren Kraft und Weg verstanden. Sie entsteht nur durch eine Einwirkung von Kraft. Bei der Leistung handelt es sich um die an einem Körper verrichtete Arbeit pro Zeiteinheit (Schwameder et al., 2013).

### **1.3 Anthropometrie**

Die Anthropometrie beschäftigt sich mit der physikalischen Messung des menschlichen Körpers, um Unterschiede in Individuen und Gruppen bestimmen zu können. Zu den anthropometrischen Parametern gehören die Masse von Gliedsegmenten, Lage von Massenzentren, Segmentlängen, Rotationszentren, Winkeln von Muskeln, Ursprung und Ansatz von Muskeln, Masse und Querschnittsfläche der Muskeln und weitere. Diese Vielzahl von physikalischen Messungen dient zur Beschreibung und Differenzierung der Merkmale von Rasse, Geschlecht, Alter und Körperart. Ausserdem sind sie für die Entwicklung von biomechanischen Modellen notwendig (Winter, 2009).

### **1.4 Leistungsbestimmende Parameter des CMJ**

Es gibt eine Vielzahl von Studien, die sich mit dem Einfluss von kinetischen, kinematischen und anthropometrischen Parametern auf die CMJ-Leistung beschäftigten. Dabei wurden beispielsweise die Beiträge der einzelnen Gelenke für einen CMJ untersucht, die optimale Ausholtiefe, der beste Einzelprädiktor oder weitere die Sprunghöhe beeinflussende kinetische,

kinematische und anthropometrische Parameter. Dafür wurden sowohl Querschnitts- wie auch Pre-to-Post-Studien durchgeführt. Das Ziel dieser Studien war herauszufinden, welche Parameter es zu verändern gilt, um die Sprunghöhe zu maximieren.

Mehrere Studien stützen die Annahme, dass eine höhere Kraft- und Drehmomententwicklungsrate zu einer höheren CMJ-Leistung führt (de Ruiter, Van Leeuwen, Heijblom, Bobbert & de Haan, 2006; Laffaye et al., 2014; Marcora & Miller, 2000; McLellan, Lovell & Gass, 2011; Thompson et al., 2013). Die Kraft- sowie die Drehmomententwicklungsrate messen die Fähigkeiten der Skelettmuskulatur schnell Muskelkräfte zu erzeugen (McErlain-Naylor, King & Pain, 2014).

Bei der Untersuchung der relativen Beiträge der einzelnen Gelenke für einen CMJ gibt es Unstimmigkeiten. Hubley und Wells (1983) zeigten mit ihrer Studie, dass die durchschnittlichen relativen Beiträge der gesamten Arbeit der Fussgelenks- und Hüftmuskeln während der Absprungphase bei einem CMJ etwa 23.5 resp. 27.5 % betrugen, wobei die restlichen 49 % der Arbeit durch die am Kniegelenk wirkenden Muskeln verrichtet wurde. Bobbert, Mackay, Schinkelshoek, Huijing und van Ingen Schenau (1986) stellten hingegen relative Anteile der Hüft-, Knie- und Fussgelenke von 38, 32 und 30 % fest. In beiden Studien lag das Verhältnis der total verrichteten Arbeit zur total gewonnenen Energie durch die drei Gelenke während der Absprungphase bei 1.0, was darauf hinweist, dass die verwendeten Methoden zu gültigen Ergebnissen führten (Bobbert et al., 1986). Die Resultate von Fukashiro und Komi (1987) legten dar, dass der grösste Teil der verrichteten Arbeit eines Sprunges durch das Hüftgelenk (51 %) geschieht, gefolgt vom Knie- (33 %) und schliesslich vom Fussgelenk (16 %). Eine neuere Studie zeigte, dass das Hüftgelenk bei guten Springern einen Beitrag von 43 % leistet, wobei das Knie- (29 %) und das Fussgelenk (28 %) einen geringeren Anteil leisten (Vanezis & Lees, 2005). Raffalt, Alkjaer und Simonsen (2016) unterschieden die Anteile bezüglich der konzentrischen und der exzentrischen Phase. Während der exzentrischen Phase wurde in den Kniegelenken im Vergleich zu den Hüft- und Fussgelenken signifikant mehr Arbeit produziert. Zusätzlich war die durch die Hüfte verrichtete Arbeit deutlich höher als die des Fussgelenks. Während der konzentrischen Phase wurde mehr Arbeit durch die Hüft- und Kniegelenke im Vergleich zu den Fussgelenken geleistet.

Die Studien, die sich mit den relativen Beiträgen der einzelnen Gelenke beschäftigten, zeigten also unterschiedliche Resultate. Die Mehrheit dieser Studien stellte fest, dass das Hüftgelenk einen grösseren Beitrag für einen CMJ leistet als das Knie- und Fussgelenk. Das Fussgelenk wies bei allen Studien den geringsten Anteil an produzierter Arbeit auf. Die Werte variierten

zwischen 16 und 30 % für das Fussgelenk, 29 und 49 % für das Kniegelenk sowie 27.5 und 51 % für das Hüftgelenk.

Ein weiterer Parameter, welcher im Zusammenhang mit der Leistung bei einem CMJ untersucht wurde, ist die Ausholtiefe. In einer Studie, in welcher die Probanden Sprünge aus der bevorzugten sowie von einer grossen und kleinen Ausholtiefe (Bereich von bis zu  $\pm 25$  cm in Bezug auf den bevorzugten Wert) durchführten, wurde gezeigt, dass die Sprunghöhe für die bevorzugte und die grosse Ausholtiefe vergleichbar war. Dies deutete darauf hin, dass die optimale Tiefe irgendwo zwischen diesen beiden Werten liegen könnte. Die optimale Tiefe wurde mithilfe der Beziehung zwischen der Sprunghöhe und der eingenommenen Ausholtiefe berechnet. Regressionsmodelle der getesteten Sprünge identifizierten eine optimale Ausholtiefe, die etwas grösser als der bevorzugte Wert, bei etwa 31-33 cm sein könnte. Deshalb wurde angenommen, dass die optimale Ausholtiefe existiert. Zusätzlich wurde festgestellt, dass eine Erhöhung der Ausholtiefe mit einer Abnahme sowohl des maximalen Bodenreaktionskraftwertes, als auch des maximalen Leistungswertes einherging (Mandic, Jakovljevic & Jaric, 2015; Mandic, Knezevic, Mirkov & Jaric, 2016). Eine weitere Studie stellte fest, dass eine grössere Ausholtiefe bei einem CMJ zu einer Abnahme des maximalen Kraftwertes und einer Zunahme der Sprunghöhe sowie des vertikalen Nettoimpulses führte. Über alle in der Studie durchgeführten Tiefen (0.15, 0.30, 0.45, 0.60, 0.75 m und bevorzugte Ausholtiefe) korrelierte der maximale Kraftwert negativ mit der Sprunghöhe ( $r = -0.41$ ,  $p = .001$ ), während der relative vertikale Nettoimpuls signifikant mit der Sprunghöhe zusammenhing ( $r = 0.93$ ,  $p < .001$ ). Diese Resultate deuten an, dass der Nettoimpuls unabhängig der anfänglich eingenommenen Ausholtiefe verwendet werden kann, um die Sprunghöhe zu beurteilen, wobei der maximale Kraftwert weniger gut geeignet ist (Kirby, McBride, Haines & Dayne, 2011). Moran und Wallace (2007) fanden mit ihrer Studie heraus, dass eine Erhöhung der exzentrischen Belastung bei einem Kniewinkel von  $70^\circ$  und  $90^\circ$ , welche anhand der negativen Arbeit des Gelenks und des KSP bestimmt wurde, zu einer deutlichen Erhöhung der Sprunghöhe führte. Diese Verbesserungen waren signifikant grösser für  $70^\circ$  im Vergleich zu  $90^\circ$ . Bei einem Kniewinkel von  $70^\circ$  waren diese Verbesserungen auf signifikante Erhöhungen der Arbeit an allen drei Gelenken (Hüft-, Knie- und Fussgelenk) zurückzuführen, wobei bei einem  $90^\circ$ -Winkel nur die Hüft- und Fussgelenke einen Beitrag zu leisten schienen (Moran & Wallace, 2007). Gheller et al. (2015) analysierten die Sprunghöhe des CMJ bei drei verschiedenen Kniewinkeln: kleiner als  $90^\circ$ , grösser als  $90^\circ$  und bevorzugter Winkel ( $84.9 \pm 6.8^\circ$ ). Die besten Sprunghöhen und relativen Nettoimpulse traten bei Winkeln kleiner als  $90^\circ$  und bei be-

vorzuzugten Winkeln auf, während die maximalen Leistungswerte und maximalen Kraftwerte bei Winkeln von mehr als 90° beobachtet wurden (Gheller et al., 2015).

Die Ergebnisse zeigten also, dass die Sprunghöhe oft grösser ist, wenn bei der Gegenbewegung beim CMJ ein kleinerer Knieflexionswinkel eingenommen wird.

McErlain-Naylor et al. (2014) fanden heraus, dass der beste individuelle Prädiktor der CMJ-Höhe der maximale Leistungswert des Kniegelenks war und 44 % der beobachteten Variationen erklärte. Mit der Hinzunahme der beiden Parameter Schulterwinkel beim Absprung und maximaler Leistungswert des Fussgelenks konnte dieser Wert auf 74 % erhöht werden. Höhere Sprünge wurden mit grösseren, maximalen Leistungswerten in den Knie- und Fussgelenken und einer grösseren Schulterbeugung beim Absprung verbunden. Der Schulterwinkel beim Absprung zeigte sich als bester kinematischer Prädiktor der Sprunghöhe. Eine grössere Schulter- und Fussgelenksbeugung resultierte in einer grösseren Sprunghöhe. Diese beiden kinematischen Parameter (Schulter- und Fussgelenkwinkel beim Absprung) erklärten 58 % der Sprunghöhenvariation, während zwei kinetische (maximaler Leistungswert in Knie- und Fussgelenk) 57 % erklärten. Erhöhungen in diesen vier Parametern sollten zu Verbesserungen der Sprunghöhe führen. Dies weist darauf hin, dass trainierbare Technikparameter und die Gelenkkinetik während des Sprunges wichtige Determinanten der CMJ-Leistung sind (McErlain-Naylor et al., 2014).

Bei der Analyse der Unterschiede in kinetischen und kinematischen Parametern zwischen besseren und schlechteren Springern legten die Resultate von Floria, Gomez-Landero, Suarez-Arrones und Harrison (2016) dar, dass die besseren Springer bei der exzentrischen Phase eine grössere Ausholtiefe einnahmen, eine höhere Abwärtsgeschwindigkeit besaßen sowie eine höhere Kraft und Kraftentwicklungsrate während des Bremsens der Abwärtsbewegung aufwiesen. Während der konzentrischen Phase erreichten die besseren Springer höhere Aufwärtsgeschwindigkeiten, einen höheren Kraftwert am Ende der Phase und eine höhere Position beim Absprung. Die tiefere und schnellere Ausführung des CMJ und die höheren exzentrischen Kräfte, welche die Abwärtsbewegung verlangsamten, führten zu einer erhöhten Krafterzeugung während der konzentrischen Phase (Floria, Gomez-Landero, Suarez-Arrones & Harrison, 2016). Eine weitere Untersuchung, die erfahrene Springer (> 0.50 m) mit Anfängern (< 0.50 m) verglich, deckte auf, dass die erfahrenen Springer signifikant grössere maximale Werte in Leistung, Geschwindigkeit, Körperverschiebung, Leistungsentwicklungsrate, Beschleunigung, Kraft und Geschwindigkeit zum Zeitpunkt des maximalen Leistungswertes sowie in konzentrischer und exzentrischer maximaler Kraft aufwiesen (Cormie, McBride & McCaulley, 2009). Die Resultate von Gonzalez-Badillo und Marques (2010) zeigten eine sig-

nifikante Korrelation der CMJ-Leistung mit der in der konzentrischen Phase erzeugten maximalen Leistung und der in der gleichen Phase erzeugten mittleren Leistung auf. Die maximale negative Geschwindigkeit war gering bis moderat in Übereinstimmung mit der CMJ-Leistung. Die Studie besagte, dass der maximale Leistungswert in der konzentrischen Phase als bester Prädiktor der CMJ-Höhe galt (Gonzalez-Badillo & Marques, 2010). Dowling und Vamos (1993) fanden heraus, dass der maximale positive Leistungswert als ein ausgezeichneter Einzelprädiktor der Sprunghöhe angesehen werden kann, aber dass das beste Dreier-Modell, ohne den maximalen Leistungswert, nur 66.2 % der Höhenabweichung erklären konnte. Eine hohe Maximalkraft ( $> 2$  Körpergewichte) wurde als notwendig, aber nicht ausreichend, für eine gute Leistung erachtet (Dowling & Vamos, 1993).

Die Studie von Laffaye et al. (2014) beurteilte die exzentrische Kraftentwicklungsrate, die konzentrischen Kraftwerte und ausgewählte Zeitvariablen (totale Zeit, exzentrische Zeit, Verhältnis zwischen exzentrischer und totaler Zeit) auf die CMJ-Leistung. Es wurde festgestellt, dass die exzentrische Kraftentwicklungsrate und die konzentrischen Kraftwerte stark mit der Sprunghöhe korrelierten, während die Zeitvariablen leicht und negativ zusammenhingen. Es wurde darauf hingewiesen, dass eine Erhöhung des konzentrischen Kraftwertes und der exzentrischen Kraftentwicklungsrate sowie eine Minimierung der Zeit der exzentrischen Phase zu einer verbesserten Sprunghöhe führt (Laffaye et al., 2014).

Riggs und Sheppard (2009) untersuchten die Unterschiede der Bodenreaktionskraft und der Leistungsmerkmale bei männlichen und weiblichen Beachvolleyballathleten bei einem CMJ. Die Ergebnisse zeigten, dass sich die maximale Kraftentwicklungsrate, der relative maximale Kraftwert (N/kg), der relative maximale wie auch der relative durchschnittliche Leistungswert (W/kg) und die relative Sprunghöhe (cm/kg) zwischen den Geschlechtern nicht signifikant unterschied. Signifikante Unterschiede gab es bei dem maximalen Kraftwert, dem Impuls, der Sprunghöhe, dem maximalen Leistungswert, dem durchschnittlichen Leistungswert und dem durchschnittlichen Kraftwert. In allen aufgezeichneten Parametern wiesen die Männer durchschnittlich höhere Werte auf als die Frauen. Die zwei grössten Korrelationen zwischen der Sprunghöhe und den Parametern wurde bei den Frauen beim relativen durchschnittlichen Leistungswert ( $r = 0.67$ ) und dem relativen maximalen Leistungswert ( $r = 0.66$ ) gefunden. Bei den Männern lagen diese beim relativen maximalen Leistungswert ( $r = 0.83$ ) und beim maximalen Leistungswert ( $r = 0.77$ ; Riggs & Sheppard, 2009).

Marshall und Moran (2015) waren die Ersten, welche die kinetischen und kinematischen Parameter einer Querschnittsanalyse mit den gleichen in einer Pre-to-post-Analyse aufgezeichneten Parametern verglich. Dies ist notwendig, da die Ergebnisse einer Querschnittsstudie nur

eine primäre Informationsquelle von leistungsbestimmenden Parametern der Sprungkraft sind. Die Pre-to-post-Analyse untersuchte die Grössenveränderungen der Parameter, die mit der Grössenveränderung der Sprunghöhe korrelierten. Der CMJ von 44 Probanden wurde vor und nach einer achtwöchigen Trainingsintervention (Dropjump-Training) analysiert. Die Sprunghöhe nach diesen acht Wochen stieg signifikant um 2.9 cm (6 %) an. 14 Parameter zeigten in der Querschnittsanalyse mit der Sprunghöhe eine signifikante Korrelation auf, aber nur 6 davon wurden nachträglich in der Pre-to-post-Analyse identifiziert. Zudem wurden 5 von 11 Parameter in der Pre-to-post-Analyse gefunden, welche bei der Querschnittsanalyse keine Signifikanz aufzeigten. Dies verdeutlicht, dass bei einer Querschnittsstudie nicht alle identifizierten Parameter für die Sprunghöhenveränderung entscheidend sind und Querschnittsstudien allein keinen Einblick in alle möglich trainierbaren Parameter liefern kann, um die Sprunghöhe zu verbessern. Zu den 5 stärksten Korrelationen zwischen der Sprunghöhe und den biomechanischen Parametern in der Querschnittsanalyse gehörten die vertikale Maximalgeschwindigkeit, der maximal erreichte Leistungswert des ganzen Körpers, die durch den ganzen Körper verrichtete Arbeit, das maximale Drehmoment des Fussgelenks und der maximale Leistungswert des Kniegelenks während der konzentrischen Phase. Bei der Pre-to-post-Analyse betraf es die vertikale Maximalgeschwindigkeit, den maximal erreichten Leistungswert des ganzen Körpers, die durch den ganzen Körper verrichtete Arbeit, den maximalen Leistungswert der Hüfte und die verrichtete Arbeit im Hüftgelenk während der konzentrischen Phase. Zusätzlich wurde eine starke Korrelation zwischen der Erhöhung des Flexionswinkels im Hüftgelenk und der Zunahme der Sprunghöhe gefunden (Marshall & Moran, 2015).

Bei der Betrachtung von anthropometrischen Parametern in Bezug auf die Sprunghöhe fanden Caia et al. (2016) heraus, dass der prozentuale Körperfettanteil mehr Variabilität des CMJ erklärte (57 %), als alle anderen Variablen, wobei das Hinzufügen von entweder Körpergewicht oder Geschlecht zum prozentualen Körperfettanteil die grösste Menge der Variabilität ausdrückte (66 %). Die Einbeziehung ausgewählter Unterschenkelabmessungen mit prozentualem Körperfett erklärte auch mehr als das prozentuale Körperfett alleine, jedoch weniger als die Kombination mit Körpergewicht oder Geschlecht. Diese Ergebnisse zeigten, dass eine beträchtliche Menge der CMJ-Leistungsvariabilitäten durch das Feststellen von prozentualem Körperfett und einer von zwei einfach gemessenen Variablen erklärt werden konnte. Umso niedriger der Körperfettanteil war, desto höhere Segmentgeschwindigkeiten und damit grössere Sprungleistungen konnten erreicht werden (Caia et al., 2016). Eine Studie von Aouadi et al. (2012) untersuchte den Zusammenhang verschiedener anthropometrischer Messungen wie

Körpermasse, Statur, Body Mass Index, untere Gliedmassenlänge und Sitzhöhe mit der Sprunghöhe eines CMJ mit Armschwung. Das Ziel war zu bestimmen, ob irgendein anthropometrischer Parameter die Sprunghöhe eines CMJ voraussagen kann. Es wurde festgestellt, dass die Länge der unteren Extremitäten mit der Sprunghöhe korrelierte ( $r = 0.69, p < 0.001$ ). Die Probanden mit längeren unteren Gliedmassen zeigten bessere CMJ-Leistungen auf. Die Messung von anthropometrischen Parametern, wie die Länge der unteren Extremitäten, könnte also Trainern in der frühen Phase der Talentidentifikation helfen (Aouadi et al., 2012).

Studien haben folglich gezeigt, dass die besseren Springer eine grössere Ausholtiefe einnahmen, höhere Kraftwerte, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen sowohl in der konzentrischen wie auch in der exzentrischen Phase aufwiesen und eine kürzere exzentrische Phasendauer besaßen. Der maximale Leistungswert wurde als ein guter Einzelprädiktor für die CMJ-Höhe angesehen, wobei die Schulter-, Knie- und Fussgelenkwinkel bei den kinematischen Parametern von Bedeutung waren. Zu den anthropometrischen Parametern, welche die Sprunghöhe am stärksten beeinflussten, gehörten vor allem der prozentuale Körperfettanteil und die Länge der unteren Gliedmassen.

### **1.5 Ziel der Arbeit**

Bis jetzt wurden für die Untersuchung von kinetischen, kinematischen und anthropometrischen Parametern bei einem CMJ mehrheitlich Querschnittsstudien durchgeführt. Eine der wenigen Studien, welche die kinetischen und kinematischen Parameter einer Querschnittsstudie mit den gleichen nach einer längeren Sprungkrafttrainingsintervention aufgezeichneten Parametern verglich und analysierte, ist diese von Marshall und Moran (2015). Bisherige Studien haben sich jeweils auf Gruppen-Korrelationen beschränkt. Es wurde also bisher noch nicht untersucht, ob die für die Sprunghöhe entscheidenden Parameter universal sind oder ob diese individuell unterschiedlich sind.

Mit dieser Arbeit möchte ich die inter- und intraindividuellen Leistungsunterschiede beim CMJ mit Armschwung in Bezug auf kinetische, kinematische und anthropometrische Parameter untersuchen. Diese Leistungsunterschiede möchte ich sowohl vor wie auch nach einer kurzen Trainingsintervention untersuchen. Dabei soll die Trainingsintervention vor allem zur Technikverbesserung des CMJ dienen. Die Probanden haben selber herauszufinden, wie sie am höchsten springen und die Sprungausführung sollte nach den Trainingswochen effizienter verlaufen. Der Vergleich der Eingangs- und Ausgangsmessung könnte eine Aussage darüber geben, ob es für die mögliche Sprunghöhenverbesserung entscheidende Parameter gibt, welche für alle Probanden gelten und falls nicht, wovon diese abhängen könnten. Dies wäre für

Trainer unterschiedlichster Sportarten von Nutzen, da sie somit ihr Training anpassen und die Sprunghöhe ihrer Athleten optimal maximieren könnten.

Daraus ergeben sich folgende Fragestellungen:

1. Welche kinetischen, kinematischen und anthropometrischen Parameter sind für die Maximierung der Sprunghöhe bei einem CMJ entscheidend?
2. Gibt es «Universalparameter» oder sind die Parameter individuell?
3. Falls die Parameter individuell sind, wovon hängen diese ab?



## 2 Methode

### 2.1 Stichprobe

An der Studie nahmen 47 sportliche, junge Erwachsene ohne körperliche Beschwerden teil. Davon mussten drei Probanden verletzungsbedingt aufhören und konnten die Anzahl an verlangten Trainings und die Ausgangsmessung nicht absolvieren. Bei 12 Probanden wurden einige Messfehler aufgezeichnet und konnten somit für die Auswertung nicht einbezogen werden. Somit blieben 32 Probanden (Geschlecht: m = 18, w = 14; Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung: Alter  $22 \pm 4$ , Körpergröße  $177.5 \pm 8.5$  cm, Gewicht  $71.7 \pm 9.0$  kg) für die Untersuchung übrig. Alle Teilnehmer wurden über den Verlauf und das Ziel der Studie informiert und unterschrieben eine Einverständniserklärung.

### 2.2 Design der Studie

Bei meiner Studie handelte es sich um eine Trainingsstudie, die eine Eingangs- und eine Ausgangsmessung sowie 6 dazwischenliegende Trainings beinhaltete. Diese absolvierten die Probanden in einer maximalen Zeitspanne von 5 Wochen. Alle Messungen und Trainings wurden in einem Labor der Universität Freiburg realisiert und begannen mit einem 10-minütigen Aufwärmen. Das Aufwärmen bestand aus 30 s Seilspringen, 30 s jumping jacks, 30 s Seilspringen, 30 s mountain climbers, 2 min Mobilisationsübungen wie auch 60 s seitliche und 60 s nach vorne gerichtete Ausfallschritte. In der Eingangs- und Ausgangsmessung wurden den Probanden 8 Marker an Zehen, Ferse, Fuss-, Knie-, Hüft-, Schulter-, Ellbogen- und Handgelenk (lateral) angebracht (siehe Abbildung 2).

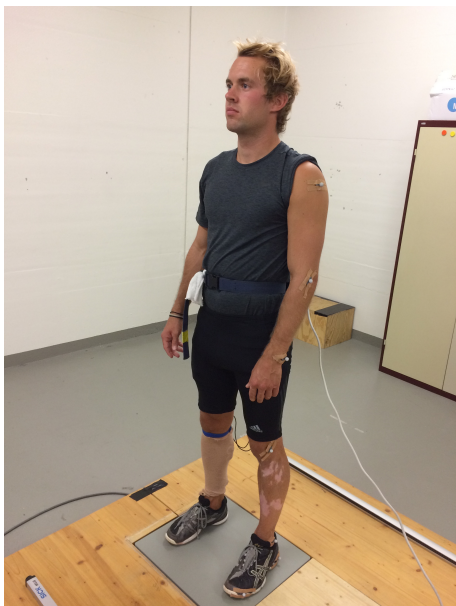


Abbildung 2. Ein Proband vor der Ausgangsmessung mit den angehefteten 8 Markern an Zehen, Ferse, Fuss-, Knie-, Hüft-, Schulter-, Ellbogen- und Handgelenk (lateral).

Sobald die Probanden bereit waren, konnten sie auf der Kraftmessplatte 10 maximale CMJ durchführen, um sich an die Sprungausführung und die Anlage zu gewöhnen.

Da ich die Messungen mit einem anderen Sportstudenten, der sich mit den Effekten eines CMJ-Trainings mit augmented Feedback (aF) und der Kombination von aF mit einem externen Aufmerksamkeitsfokus (EF) auf die Verbesserung der Sprunghöhe befasste, wurden die Sprungserien in 4 verschiedene Bedingungen, in welchen jeweils 10 maximale CMJ mit Armeinsatz durchgeführt wurden, unterteilt:

- (a) neutrale Bedingung (ohne Feedback und ohne Fokus)
- (b) mit EF
- (c) mit aF über die Sprunghöhe
- (d) EF + aF

In der Bedingung aF konnten die Probanden nach jedem Sprung direkt die Sprunghöhe auf einem Monitor ablesen. Die Sprunghöhe sollten sie beim darauffolgenden Sprung versuchen zu erhöhen.

Beim EF mussten sich die Probanden bemühen, einen über ihnen aufgehängten, regulierbaren Tennisball mit dem Kopf zu berühren. Zwischen den Bedingungen gab es 3 min Pause und zwischen den Sprüngen 10 s. Die Reihenfolge der Bedingungen wurde dabei randomisiert. Während den Sprüngen wurden kinetische, kinematische und anthropometrische Parameter aufgezeichnet. Für die Trainings wurden die Probanden in eine von drei Gruppen eingeteilt, so dass die Gruppen bezüglich Geschlecht, Grösse, Alter und durchschnittlicher Sprunghöhe der Eingangsmessung heterogen aufgebaut waren:

- 1) Training ohne Feedback und ohne Fokus
- 2) Training mit aF
- 3) Training mit aF + EF

Die Trainings beinhalteten 10 Serien à 6 CMJ in der jeweiligen Bedingung, wobei eine Pause von 10 s zwischen den Sprüngen und 2 min zwischen den Serien eingebaut waren. Nach 5 Serien wurde zusätzlich eine Pause von 5 min eingelegt. Bei der Durchführung der Messungen und der Trainings galt zu beachten, dass das erste Training spätestens in der darauffolgenden Woche der Eingangsmessung angesetzt wurde, die Trainingsintervention maximal drei Wochen andauerte und die Ausgangsmessung spätestens in der darauffolgenden Woche

der letzten Trainingseinheit erfolgte. Zwischen den Messungen und den Trainings musste mindestens ein Ruhetag eingehalten werden. Ausserdem mussten die Probanden die beiden Messungen mit den gleichen Turnschuhen absolvieren.

### **2.3 Untersuchungsmethoden und -instrumente**

Während der Eingangs- und Ausgangsmessung wurden die kinetischen Daten mit Hilfe einer Kraftmessplatte (OR6-7, Advanced Mechanical Technology Inc., Watertown, MA, USA) aufgezeichnet. Diese kann die drei orthogonalen Kraftkomponenten entlang der x-, y- und z-Achse zu jedem Zeitpunkt messen («OR6-7.pdf», o.D.). Die Kraftmessplatte hatte ein Mass von 46.6 x 50.8 cm und befand sich in der Mitte einer Holzplattenkonstruktion, um die Landefläche zu vergrössern (siehe Abbildung 2). Kinematische sowie anthropometrische Daten wurden mit einem Optitrack-System (NaturalPoint Inc., Corvallis, OR, USA) erfasst. Dabei wurden die an den Probanden angehefteten acht Marker durch mehrere installierte Kameras erkannt und mittels Motive, einer optical motion capture software, aufgezeichnet.

Während des Trainings wurde nur ein OptoGait (Microgate Srl, Bolzano, Italien) benötigt, welches die Sprunghöhe über die Flugzeit berechnete und somit den Probanden direkt nach jedem Sprung anzeigen konnte. Beim OptoGait handelt es sich um ein optisches Messinstrument. Es besteht aus zwei Messstäben (Sender- und Empfängerstab), die anhand 96 LEDs pro Stab untereinander kommunizieren. Sie sind in der Lage die Kontakt- und Flugzeit einer Serie von Sprüngen zu messen und besitzen dabei eine Genauigkeit von einer Millisekunde («Microgate OptoGait», o.D.).

### **2.4 Auswertung und statistische Analyse der Daten**

Für die Datenauswertung wurden anhand der kinematischen und anthropometrischen (Optitrack) sowie der kinetischen Daten (Kraftkurven) in Matlab unterschiedliche, in der Literatur vorgeschlagene, Parameter berechnet. Diese wurden für meine Untersuchung nicht bezüglich der Bedingungen (a-d) unterschieden.

Zu den anthropometrischen Parametern gehörten die Segmentlängen [cm] (Fuss, Oberschenkel, Unterschenkel, Rumpf, Oberarm und Unterarm) wie auch die Körpergrösse [cm]. Die für meine Arbeit relevanten, kinetischen Parameter waren das Gewicht der Probanden [kg], die Absprunghöhe des KSP über den Impuls gemessen [cm], die Dauer vom Anfang der Bewegung bis zum Auftreten des maximalen Kraftwertes [ms], die Dauer vom Auftreten des maximalen Kraftwertes bis zum Absprung [ms], der maximale Kraftwert [N], der maximale relative Kraftwert [N/kg], der maximale exzentrische und konzentrische Kraftwert [N], die An-

fangskraft [N], die Abfluggeschwindigkeit und die maximale Geschwindigkeit des KSP [m/s], die tiefste Ausholposition [cm] (negativer Wert, da Ausgangsposition höher ist), der maximale Leistungswert [W] und der relative maximale Leistungswert [W/kg]. Die Anfangskraft ist die Kraft, die am Ende der Ausholbewegung bei einem CMJ wirkt. Diese Kraft ist dabei grösser als der Betrag der Gewichtskraft (Jansen, 2011). Die kinematischen Parameter waren die Sprunghöhe mittels des Hüftmarkers [cm], die Dauer der exzentrischen und der konzentrischen Phase sowie die Gesamtdauer der CMJ-Bewegung [ms], die maximale negative und positive Geschwindigkeit der Hüfte [m/s] wie auch deren Zeitpunkte relativ zum Absprung [ms], die Abfluggeschwindigkeit der Hüfte [m/s], der Abflugwinkel vorne/hinten und links/rechts der Hüfte [°] (Abweichung von der Vertikalen; negativ = nach vorne/nach rechts), der maximale Flexionswinkel der Hüfte, des Fusses und des Knies relativ zur Ausgangsposition [°] sowie deren Zeitpunkte relativ zum Absprung [ms], der Absprungwinkel der Hüfte, des Fusses und des Knies relativ zur Ausgangsposition [°], die maximale exzentrische und konzentrische Winkelgeschwindigkeit der Hüfte, des Fusses und des Knies [°/s] wie auch deren Zeitpunkte relativ zum Absprung [ms].

Mithilfe von SPSS konnten multiple Regressionsanalysen durchgeführt werden, um auf intra- sowie interindividueller Ebene die für die Sprunghöhe leistungsbestimmenden Parameter zu identifizieren. Für die interindividuelle Analyse wurde jeweils der beste Sprung eines Probanden ausgewählt und analysiert. Excel diente zur Durchführung von unterschiedlichen t-Tests und somit zur Identifizierung von signifikanten Grössenveränderungen der biomechanischen Parameter zwischen der Pre- und der Post-Messung der gleichen wie auch zwischen unterschiedlichen Probanden.

### 3 Resultate

#### 3.1 Interindividuell

**3.1.1 Korrelationen zwischen der Sprunghöhe und den biomechanischen Parametern.** In der Pre-Analyse zeigten 24 Parameter eine signifikante ( $p < 0.05$ ) Korrelation mit der Sprunghöhe auf, wovon 19 mit der Sprunghöhe in der Post-Analyse einen Zusammenhang aufzeigten (siehe Tabelle 1). Zu den fünf Parametern, die nur in der Pre-Analyse als signifikant identifiziert wurden, gehörten die Segmentlänge des Oberarmes, die tiefste Ausholposition, der Absprungwinkel des Knies und der Hüfte sowie die maximale exzentrische Winkelgeschwindigkeit der Hüfte. Zusätzlich wurden 7 von 26 Parameter, die in der Post-Analyse eine signifikante Korrelation mit der Sprunghöhe aufwiesen, nicht in der Pre-Analyse identifiziert. Diese sieben Parameter waren die Segmentlänge des Oberschenkels, die Absprunghöhe über den Impuls gemessen, der Zeitpunkt der maximalen Flexion des Fusses und des Knies, der Zeitpunkt der maximalen exzentrischen Winkelgeschwindigkeit des Fusses und des Knies wie auch der Zeitpunkt der maximalen konzentrischen Winkelgeschwindigkeit der Schulter.

Tabelle 1

*Korrelationen zwischen der Sprunghöhe und den biomechanischen Parametern eines Countermovement Jumps (CMJ) in der PRE- und POST-Analyse*

Parameter	PRE <i>r</i> ( <i>p</i> )	POST <i>r</i> ( <i>p</i> )
<b>Anthropometrische Parameter</b>		
Segmentlängen		
Fuss	0.24 (0.185)	0.22 (0.220)
Oberschenkel	0.35 (0.051)	0.35 (0.046)*
Unterschenkel	0.54 (0.001)**	0.68 (< 0.001)***
Rumpf	0.40 (0.023)*	0.63 (< 0.001)***
Oberarm	0.40 (0.022)*	0.30 (0.096)
Unterarm	0.72 (< 0.001)***	0.74 (< 0.001)***
Körpergrösse	0.70 (< 0.001)***	0.69 (< 0.001)***
<b>Kinetische Parameter</b>		
Gewicht	0.73 (< 0.001)***	0.71 (< 0.001)***
Absprunghöhe Impuls	0.25 (0.174)	0.52 (0.002)**
Dauer Anfang – maximale Kraft	0.07 (0.713)	0.16 (0.372)
Dauer maximale Kraft – Absprung	-0.08 (0.675)	-0.15 (0.404)
Maximale Kraft	0.81 (< 0.001)***	0.76 (< 0.001)***

Maximale relative Kraft	0.61 (< 0.001)***	0.45 (0.010)*
Maximale Kraft exz.	0.68 (< 0.001)***	0.64 (< 0.001)***
Maximale Kraft konz.	0.81 (< 0.001)***	0.76 (< 0.001)***
Anfangskraft	0.72 (< 0.001)***	0.65 (< 0.001)***
Abfluggeschwindigkeit des KSP	0.95 (< 0.001)***	0.93 (< 0.001)***
Maximale Geschwindigkeit des KSP	0.95 (< 0.001)***	0.94 (< 0.001)***
Tieftste Position Ausholen	-0.56 (< 0.001)***	-0.26 (0.155)
Maximale Leistung	0.89 (< 0.001)***	0.89 (< 0.001)***
Maximale relative Leistung	0.89 (< 0.001)***	0.89 (< 0.001)***
<b>Kinematische Parameter</b>		
Dauer exz. Phase	0.08 (0.659)	0.24 (0.190)
Dauer konz. Phase	-0.13 (0.462)	-0.35 (0.053)
Gesamtdauer	0.04 (0.846)	0.08 (0.670)
Hüfte		
Max. neg. Geschwindigkeit	-0.33 (0.063)	-0.12 (0.513)
Zeitpunkt max. neg. Geschwindigkeit	0.24 (0.178)	0.32 (0.071)
Max. pos. Geschwindigkeit	0.89 (< 0.001)***	0.90 (< 0.001)***
Zeitpunkt max. pos. Geschwindigkeit	-0.03 (0.887)	0.14 (0.454)
Abfluggeschwindigkeit	0.77 (< 0.001)***	0.88 (< 0.001)***
Abflugwinkel vorne/hinten	0.30 (0.099)	0.26 (0.149)
Abflugwinkel links/rechts	-0.04 (0.818)	0.08 (0.674)
Max. Flexion		
Fuss	-0.19 (0.285)	0.26 (0.156)
Knie	0.26 (0.147)	-0.15 (0.426)
Hüfte	0.32 (0.071)	0.18 (0.331)
Schulter	-0.03 (0.857)	-0.08 (0.675)
Zeitpunkt max. Flexion		
Fuss	0.10 (0.588)	0.54 (0.001)**
Knie	0.25 (0.159)	0.41 (0.021)*
Hüfte	-0.09 (0.638)	0.21 (0.245)
Schulter	-0.10 (0.590)	0.08 (0.645)
Absprungwinkel		
Fuss	-0.01 (0.949)	-0.06 (0.753)
Knie	-0.41 (0.021)*	-0.25 (0.174)
Hüfte	-0.40 (0.025)*	-0.25 (0.173)
Schulter	0.21 (0.241)	0.15 (0.400)

Max. Winkelgeschwindigkeit exz.		
Fuss	-0.21 (0.240)	-0.09 (0.616)
Knie	-0.26 (0.156)	0.21 (0.258)
Hüfte	-0.36 (0.041)*	-0.11 (0.545)
Schulter	-0.26 (0.152)	-0.02 (0.896)
Zeitpunkt max. Winkelgeschwindigkeit exz.		
Fuss	0.27 (0.134)	0.45 (0.011)*
Knie	0.21 (0.247)	0.41 (0.021)*
Hüfte	-0.06 (0.735)	0.18 (0.313)
Schulter	-0.14 (0.440)	0.15 (0.404)
Max. Winkelgeschwindigkeit konz.		
Fuss	0.38 (0.034)*	0.45 (0.009)**
Knie	0.52 (0.002)**	0.51 (0.003)**
Hüfte	0.46 (0.007)**	0.45 (0.009)**
Schulter	0.12 (0.524)	-0.19 (0.309)
Zeitpunkt max. Winkelgeschwindigkeit konz.		
Fuss	-0.10 (0.603)	0.06 (0.741)
Knie	0.01 (0.952)	0.15 (0.405)
Hüfte	0.20 (0.263)	0.30 (0.092)
Schulter	-0.15 (0.422)	0.37 (0.040)*

*Anmerkung.* Von jedem der 32 Probanden wurde jeweils der beste CMJ-Sprung für die Korrelationsanalyse verwendet.  $r$  = Bravais-Pearson-Korrelationskoeffizient.  $p$  = Signifikanzwert. exz. = exzentrisch. konz. = konzentrisch. KSP = Körperschwerpunkt.

\* $p < 0.05$ . \*\* $p < 0.01$  \*\*\* $p < 0.001$ .

**Pre.** Zu den in der Pre-Analyse mit der Sprunghöhe am stärksten korrelierenden Parametern gehörten die maximale Geschwindigkeit des KSP ( $r = 0.95$ ), die Abfluggeschwindigkeit des KSP ( $r = 0.95$ ), die maximale positive Geschwindigkeit der Hüfte ( $r = 0.89$ ), der maximale (relative) Leistungswert ( $r = 0.89$ ), der maximale (konzentrische) Kraftwert ( $r = 0.81$ ), die Abfluggeschwindigkeit der Hüfte ( $r = 0.77$ ), das Gewicht ( $r = 0.73$ ), die Segmentlänge des Unterarmes ( $r = 0.72$ ), die Anfangskraft ( $r = 0.72$ ), die Körpergrösse ( $r = 0.70$ ), der maximale exzentrische Kraftwert ( $r = 0.68$ ), der maximale relative Kraftwert ( $r = 0.61$ ), die tiefste Ausholposition ( $r = -0.56$ ), die Segmentlänge des Unterschenkels ( $r = 0.54$ ) und die maximale konzentrische Winkelgeschwindigkeit des Knies ( $r = 0.52$ ; siehe Tabelle 1).

Da die Geschwindigkeitsparameter (Abfluggeschwindigkeit und maximale Geschwindigkeit des KSP sowie maximale positive Geschwindigkeit und Abfluggeschwindigkeit der Hüfte)

sehr stark mit der Sprunghöhe und auch untereinander korrelierten, wurden diese teilweise für die restlichen inter- und intraindividuellen Analysen nicht weiter beachtet.

Tabelle 2

*Korrelationen zwischen der Sprunghöhe und den biomechanischen Parametern sowie die signifikanten Unterschiede zwischen den weiblichen und männlichen Probanden in der PRE- und POST-Analyse*

Parameter	PRE			POST		
	w = 14 (42.7 ± 3.8 cm) <i>r</i> ( <i>p</i> )	m = 18 (59.1 ± 4.8 cm) <i>r</i> ( <i>p</i> )	Sign. Unter- schied <i>p</i>	w = 14 (44.4 ± 3.9 cm) <i>r</i> ( <i>p</i> )	m = 18 (62.5 ± 5.3) <i>r</i> ( <i>p</i> )	Sign. Unter- schied <i>p</i>
<b>Anthropometrische Parameter</b>						
Segmentlängen						
Fuss	0.06 (0.850)	-0.32 (0.196)	0.037*	-0.24 (0.413)	-0.35 (0.159)	0.025*
Oberschenkel	0.39 (0.164)	0.09 (0.733)	0.093	-0.20 (0.488)	0.12 (0.637)	0.032*
Unterschenkel	-0.52 (0.057)	0.38 (0.120)	< 0.001***	-0.51 (0.060)	0.17 (0.489)	< 0.001***
Rumpf	-0.31 (0.278)	-0.09 (0.713)	0.002**	0.03 (0.909)	0.22 (0.377)	< 0.001***
Oberarm	-0.39 (0.170)	0.10 (0.684)	0.009**	-0.30 (0.300)	0.02 (0.926)	0.028*
Unterarm	-0.16 (0.589)	0.42 (0.082)	< 0.001***	-0.42 (0.131)	0.16 (0.533)	< 0.001***
Körpergrösse	-0.10 (0.724)	0.14 (0.577)	< 0.001***	-0.33 (0.248)	0.14 (0.589)	< 0.001***
<b>Kinetische Parameter</b>						
Gewicht	-0.21 (0.469)	0.34 (0.165)	< 0.001***	-0.25 (0.392)	0.20 (0.434)	< 0.001***
Absprunghöhe Impuls	-0.27 (0.350)	0.20 (0.433)	0.201	-0.66 (0.010)*	0.21 (0.402)	< 0.001***
Dauer Anfang – maximale Kraft	-0.57 (0.033)*	-0.28 (0.258)	0.131	0.00 (0.988)	0.18 (0.482)	0.504
Dauer maximale Kraft – Absprung	0.39 (0.173)	-0.08 (0.750)	0.486	-0.36 (0.201)	-0.29 (0.239)	0.947
Maximale Kraft	0.22 (0.459)	0.57 (0.014)*	< 0.001***	0.23 (0.421)	0.27 (0.272)	< 0.001***
Maximale relative Kraft	0.62 (0.019)*	0.51 (0.030)*	0.014*	0.44 (0.116)	0.16 (0.528)	0.030*
Maximale Kraft exz.	0.45 (0.107)	0.41 (0.094)	< 0.001***	0.27 (0.356)	0.16 (0.529)	< 0.001***
Maximale Kraft konz.	0.18 (0.542)	0.62 (0.006)**	< 0.001***	0.24 (0.409)	0.31 (0.211)	< 0.001***



Anfangskraft	0.46 (0.099)	0.50 (0.036)*	< 0.001***	0.30 (0.306)	0.16 (0.532)	< 0.001***
Abfluggeschw. des KSP	0.76 (0.002)**	0.85 (< 0.001)***	< 0.001***	0.62 (0.018)*	0.78 (< 0.001)***	< 0.001***
Maximale Geschw. des KSP	0.75 (0.002)**	0.84 (< 0.001)***	< 0.001***	0.63 (0.015)*	0.75 (< 0.001)***	< 0.001***
Tiefste Position Ausholen	-0.09 (0.766)	0.15 (0.559)	< 0.001***	0.37 (0.190)	0.04 (0.870)	0.039*
Maximale Leistung	0.33 (0.243)	0.66 (0.003)**	< 0.001***	0.44 (0.116)	0.51 (0.029)*	< 0.001***
Maximale relative Leistung	0.59 (0.026)*	0.66 (0.003)**	< 0.001***	0.66 (0.011)*	0.59 (0.010)*	< 0.001***
<b>Kinematische Parameter</b>						
Dauer exz.	-0.39 (0.164)	-0.32 (0.201)	0.143	0.05 (0.873)	0.08 (0.750)	0.202
Dauer konz.	-0.51 (0.065)	-0.53 (0.024)*	0.567	-0.65 (0.012)*	-0.28 (0.259)	0.335
Gesamtdauer	-0.51 (0.060)	-0.43 (0.077)	0.133	-0.34 (0.232)	0.00 (1.000)	0.432
<b>Hüfte</b>						
Max. neg. Geschw.	-0.52 (0.058)	-0.25 (0.311)	0.293	0.05 (0.853)	0.05 (0.855)	0.385
Zeitpunkt max. neg. Geschw.	0.48 (0.081)	0.52 (0.028)*	0.829	0.60 (0.023)*	0.38 (0.116)	0.467
Max. pos. Geschw.	0.85 (< 0.001)***	0.62 (0.006)**	< 0.001***	0.81 (< 0.001)***	0.67 (0.002)**	< 0.001***
Zeitpunkt max. pos. Geschw.	0.54 (0.047)*	-0.41 (0.089)	0.791	0.25 (0.383)	0.03 (0.901)	0.612
Abfluggeschw.	0.84 (< 0.001)***	0.20 (0.431)	< 0.001***	0.74 (0.002)**	0.72 (< 0.001)***	< 0.001***
Abflugwinkel vorne/hinten	-0.23 (0.438)	0.57 (0.013)*	0.242	0.01 (0.972)	0.26 (0.294)	0.231
Abflugwinkel links/rechts	-0.22 (0.457)	0.12 (0.631)	0.775	-0.46 (0.095)	-0.13 (0.611)	0.229
<b>Max. Flexion</b>						
Fuss	-0.51 (0.064)	-0.40 (0.099)	0.958	0.30 (0.291)	-0.37 (0.128)	0.048
Knie	0.21 (0.468)	0.07 (0.787)	0.194	-0.46 (0.099)	-0.02 (0.932)	0.689
Hüfte	-0.47 (0.093)	-0.40 (0.101)	0.001**	-0.41 (0.147)	-0.04 (0.867)	0.114
Schulter	-0.09 (0.762)	0.15 (0.558)	0.719	-0.06 (0.834)	0.04 (0.889)	0.641
<b>Zeitpunkt max. Flexion</b>						
Fuss	-0.08 (0.778)	0.26 (0.296)	0.812	0.73 (0.003)**	0.25 (0.322)	0.021*

Knie	0.32 (0.273)	0.32 (0.193)	0.485	0.67 (0.008)**	0.21 (0.395)	0.144
Hüfte	0.42 (0.132)	0.15 (0.539)	0.197	0.63 (0.016)*	0.03 (0.910)	0.655
Schulter	-0.13 (0.665)	0.29 (0.248)	0.330	0.15 (0.619)	0.01 (0.958)	0.733
Absprungwin- kel						
Fuss	-0.23 (0.431)	0.29 (0.242)	0.687	0.36 (0.204)	0.06 (0.803)	0.450
Knie	0.32 (0.258)	-0.64 (0.004)**	0.089	-0.30 (0.300)	-0.13 (0.616)	0.292
Hüfte	-0.16 (0.574)	-0.62 (0.006)**	0.241	-0.11 (0.714)	-0.19 (0.453)	0.273
Schulter	0.06 (0.842)	0.35 (0.149)	0.422	-0.03 (0.912)	0.25 (0.317)	0.576
Max. Winkel- geschw. exz.						
Fuss	-0.47 (0.087)	-0.56 (0.016)*	0.885	-0.13 (0.660)	-0.14 (0.593)	0.845
Knie	-0.63 (0.016)*	-0.27 (0.275)	0.694	0.01 (0.970)	0.29 (0.239)	0.491
Hüfte	-0.47 (0.093)	0.02 (0.952)	0.075	-0.14 (0.638)	0.44 (0.067)	0.130
Schulter	0.39 (0.167)	-0.27 (0.282)	0.153	0.35 (0.220)	0.01 (0.972)	0.596
Zeitpunkt max. Winkelgeschw. exz.						
Fuss	0.48 (0.081)	0.27 (0.286)	0.498	0.63 (0.015)*	0.42 (0.080)	0.153
Knie	0.39 (0.171)	0.36 (0.138)	0.807	0.46 (0.095)	0.49 (0.037)*	0.207
Hüfte	0.41 (0.150)	-0.03 (0.912)	0.406	0.78 (0.001)**	0.11 (0.659)	0.936
Schulter	-0.18 (0.543)	0.23 (0.352)	0.275	-0.18 (0.528)	-0.18 (0.487)	0.159
Max. Winkel- geschw. konz.						
Fuss	0.38 (0.184)	0.46 (0.052)	0.253	0.29 (0.312)	0.37 (0.133)	0.055
Knie	0.76 (0.002)**	0.19 (0.444)	0.026*	0.50 (0.070)	0.09 (0.714)	0.007**
Hüfte	0.51 (0.060)	0.13 (0.597)	0.026*	0.31 (0.280)	-0.10 (0.679)	0.005**
Schulter	0.05 (0.872)	0.05 (0.851)	0.556	-0.41 (0.145)	-0.17 (0.510)	0.658
Zeitpunkt max. Winkelgeschw. konz.						
Fuss	0.63 (0.016)*	-0.34 (0.167)	0.577	-0.26 (0.364)	0.07 (0.790)	0.650
Knie	0.75 (0.002)**	-0.43 (0.074)	0.855	-0.08 (0.794)	0.01 (0.979)	0.320
Hüfte	0.74 (0.003)**	-0.36 (0.143)	0.502	0.12 (0.671)	-0.05 (0.855)	0.076
Schulter	-0.10 (0.723)	-0.17 (0.511)	0.624	0.14 (0.622)	0.01 (0.973)	0.031*

*Anmerkung.* Von jedem der 32 Probanden wurde jeweils der beste CMJ-Sprung für die Analyse verwendet.  $r$  = Bravais-Pearson-Korrelationskoeffizient.  $p$  = Signifikanzwert. Sign. Unterschied = Signifikanter Unterschied. exz. = exzentrisch. konz. = konzentrisch. KSP = Körperschwerpunkt. w = weibliche Probanden. m = männliche Probanden. Geschw. = Geschwindigkeit. Signifikanter Unterschied der Sprunghöhe zwischen den Frauen und Männer lag bei  $p < 0.001$ \*\*\* (PRE und POST).

\* $p < 0.05$ . \*\* $p < 0.01$  \*\*\* $p < 0.001$ .

Die Tabelle 2 zeigt die bei den weiblichen (14/32) und männlichen Probanden (18/32) gefundenen Korrelationen mit der Sprunghöhe auf. Bei den Frauen gehörten die maximale konzentrische Winkelgeschwindigkeit des Knies ( $r = 0.76$ ), der Zeitpunkt der maximalen konzentrischen Winkelgeschwindigkeit des Knies ( $r = 0.75$ ) und der Hüfte ( $r = 0.74$ ), die maximale exzentrische Winkelgeschwindigkeit des Knies ( $r = -0.63$ ), der Zeitpunkt der maximalen konzentrischen Winkelgeschwindigkeit des Fusses ( $r = 0.63$ ), der maximale relative Kraftwert ( $r = 0.62$ ), der maximale relative Leistungswert ( $r = 0.59$ ), die Dauer vom Anfang der Bewegung bis zur Erreichung des maximalen Kraftwertes ( $r = -0.57$ ) und der Zeitpunkt der maximalen positiven Geschwindigkeit der Hüfte ( $r = 0.54$ ) zu den signifikanten Korrelationen mit der Sprunghöhe. Die Männer (18/32) dagegen zeigten Korrelationen der Sprunghöhe mit den Parametern maximaler (relativer) Leistungswert ( $r = 0.66$ ), Absprungwinkel des Knies ( $r = -0.64$ ), maximaler konzentrischer Kraftwert ( $r = 0.62$ ), Absprungwinkel der Hüfte ( $r = -0.62$ ), maximaler Kraftwert ( $r = 0.57$ ), Abflugwinkel der Hüfte nach vorne und hinten ( $r = 0.57$ ), maximale exzentrische Winkelgeschwindigkeit des Fusses ( $r = -0.56$ ), Dauer der konzentrischen Phase ( $r = -0.53$ ), Zeitpunkt der maximalen negativen Geschwindigkeit der Hüfte ( $r = 0.52$ ), maximaler relativer Kraftwert ( $r = 0.51$ ) und Anfangskraft ( $r = 0.50$ ) auf (siehe Tabelle 2). Nur die Parameter maximaler relativer Kraftwert und maximaler relativer Leistungswert wiesen sowohl bei den weiblichen wie auch bei den männlichen Probanden eine signifikante Korrelation mit der Sprunghöhe auf.

Die weiblichen Probanden erzielten im Schnitt eine Sprunghöhe von  $42.7 \pm 3.8$  cm und die Männlichen  $59.1 \pm 4.8$  cm. Signifikante Unterschiede zwischen den Frauen und den Männern wurden bei den Parametern Sprunghöhe, Segmentlängen (ausser Oberschenkel), Gewicht, maximaler (relativer, exzentrischer und konzentrischer) Kraftwert, Anfangskraft, Abfluggeschwindigkeit und maximale Geschwindigkeit des KSP, tiefste Ausholposition, maximaler (relativer) Leistungswert, maximale positive Geschwindigkeit und Abfluggeschwindigkeit der Hüfte, maximale Flexion der Hüfte sowie maximale konzentrische Winkelgeschwindigkeit des Knies und der Hüfte gefunden.

**Post.** In der Post-Analyse zeigten die maximale Geschwindigkeit des KSP ( $r = 0.94$ ), die Abfluggeschwindigkeit des KSP ( $r = 0.93$ ), die maximale positive Geschwindigkeit der Hüfte ( $r = 0.90$ ), der maximale (relative) Leistungswert ( $r = 0.89$ ), die Abfluggeschwindigkeit der Hüfte ( $r = 0.88$ ), der maximale (konzentrische) Kraftwert ( $r = 0.76$ ), die Segmentlänge des Unterarmes ( $r = 0.74$ ), das Gewicht ( $r = 0.71$ ), die Körpergrösse ( $r = 0.69$ ), die Segmentlänge des Unterschenkels ( $r = 0.68$ ), die Anfangskraft ( $r = 0.65$ ), der maximale exzentrische Kraftwert ( $r = 0.64$ ), die Segmentlänge des Rumpfes ( $r = 0.63$ ), der Zeitpunkt der maximalen Fle-

xion des Fusses ( $r = 0.54$ ), die Absprunghöhe über den Impuls gemessen ( $r = 0.52$ ) und die maximale konzentrische Winkelgeschwindigkeit des Knies ( $r = 0.51$ ) die stärksten linearen Zusammenhänge mit der Sprunghöhe auf (siehe Tabelle 1).

Die weiblichen Probanden zeigten eine signifikante Korrelation mit der Sprunghöhe in den Parametern Zeitpunkt der maximalen exzentrischen Winkelgeschwindigkeit der Hüfte ( $r = 0.78$ ), Zeitpunkt der maximalen Flexion des Fusses ( $r = 0.73$ ), Zeitpunkt der maximalen Flexion des Knies ( $r = 0.67$ ), Absprunghöhe über den Impuls gemessen ( $r = -0.66$ ), maximaler relativer Leistungswert ( $r = 0.66$ ), Dauer der konzentrischen Phase ( $r = -0.65$ ), Zeitpunkt der maximalen Flexion der Hüfte ( $r = 0.63$ ), Zeitpunkt der maximalen exzentrischen Winkelgeschwindigkeit des Fusses ( $r = 0.63$ ) und Zeitpunkt der maximalen negativen Geschwindigkeit der Hüfte ( $r = 0.60$ ). Zu den bei den männlichen Probanden gefundenen signifikanten Korrelationen mit der Sprunghöhe gehörten der maximale relative Leistungswert ( $r = 0.59$ ), der maximale Leistungswert ( $r = 0.51$ ) und der Zeitpunkt der maximalen exzentrischen Winkelgeschwindigkeit des Knies ( $r = 0.49$ ; siehe Tabelle 2). In der Post-Analyse zeigte sich, dass nur der maximale relative Leistungswert eine signifikante Korrelation mit der Sprunghöhe bei den Frauen und den Männern aufwies.

Die durchschnittliche Sprunghöhe betrug für die Frauen  $44.4 \pm 3.9$  cm und für die Männer  $62.5 \pm 5.3$  cm. Die signifikanten Unterschiede zwischen den Frauen und Männern konnten bei den Parametern Sprunghöhe, Segmentlängen, Gewicht, Absprunghöhe über den Impuls gemessen, maximaler (relativer, exzentrischer und konzentrischer) Kraftwert, Anfangskraft, Abfluggeschwindigkeit und maximale Geschwindigkeit des KSP, tiefste Ausholposition, maximaler (relativer) Leistungswert, maximale positive Geschwindigkeit und Abfluggeschwindigkeit der Hüfte, Zeitpunkt der maximalen Flexion des Fusses, maximale konzentrische Winkelgeschwindigkeit des Knies und der Hüfte wie auch Zeitpunkt der maximalen konzentrischen Winkelgeschwindigkeit der Schulter entdeckt werden.

### 3.1.2 Biomechanische Größenveränderungen vom PRE zum POST.

Tabelle 3

*Biomechanische Größenveränderungen vom PRE zum POST*

Parameter	PRE $M \pm SD$	POST $M \pm SD$	POST-PRE $M \pm SD$	Prozentuale Veränderung ( $p$ )
Kinetische Parameter				
Sprunghöhe (cm)	$51.9 \pm 9.3$	$54.6 \pm 10.2$	$2.7 \pm 3.1$	$5.1 (< 0.001)^{***}$

Gewicht (kg)	71.7 ± 9.0	71.6 ± 8.8	-0.1 ± 1.0	-0.1 (0.635)
Absprunghöhe Impuls (cm)	15.6 ± 2.8	15.6 ± 2.5	0.0 ± 2.8	-0.3 (0.924)
Dauer Anfang bis maximale Kraft (ms)	821.6 ± 236.2	897.6 ± 232.4	76.0 ± 254.0	9.3 (0.100)
Dauer maximale Kraft bis Absprung (ms)	206.3 ± 124.8	231.7 ± 153.6	25.4 ± 169.2	12.3 (0.402)
Maximale Kraft (N)	1638.0 ± 283.7	1679.0 ± 315.5	41.0 ± 159.5	2.5 (0.156)
Maximale relative Kraft (N/kg)	22.8 ± 1.8	23.4 ± 2.9	0.6 ± 2.3	2.7 (0.155)
Maximale Kraft exz. (N)	1456.7 ± 318.8	1559.0 ± 363.6	102.3 ± 222.9	7.0 (0.014)*
Maximale Kraft konz. (N)	1615.0 ± 284.8	1658.4 ± 313.5	43.3 ± 179.8	2.7 (0.182)
Anfangskraft (W)	1417.1 ± 297.3	1517.4 ± 347.4	100.4 ± 236.0	7.1 (0.022)*
Abfluggeschwindigkeit des KSP (m/s)	2.6 ± 0.3	2.6 ± 0.3	0.1 ± 0.1	2.0 (0.004)**
Maximale Geschwindigkeit des KSP (m/s)	2.7 ± 0.3	2.8 ± 0.3	0.0 ± 0.1	1.7 (0.005)**
Tieftste Position Ausholen (cm)	-31.8 ± 6.4	-36.7 ± 7.1	-4.9 ± 5.6	15.3 (< 0.001)***
Maximale Leistung (W)	3662.4	3746.4	84.0 ± 319.7	2.3 (0.147)
Maximale relative Leistung (W/kg)	50.3 ± 9.0	51.6 ± 9.4	1.2 ± 4.4	2.4 (0.122)

#### Kinematische Parameter

Dauer exz. Phase (ms)	697.7 ± 162.8	765.0 ± 174.3	67.3 ± 218.7	9.7 (0.091)
Dauer konz. Phase (ms)	330.2 ± 50.5	364.3 ± 78.1	34.1 ± 50.5	10.3 (< 0.001)***
Gesamtdauer (ms)	1027.8 ± 178.4	1129.3 ± 184.7	101.5 ± 222.2	9.9 (0.015)*
Hüfte				
Max. neg. Geschwindigkeit. (m/s)	-1.2 ± 0.4	-1.4 ± 0.4	-0.1 ± 0.3	11.0 (0.007)**
Zeitpunkt max. neg. Geschwindigkeit (ms)	-522.0 ± 115.5	-545.4 ± 133.1	-23.4 ± 98.9	4.5 (0.190)
Max. pos. Geschwindigkeit (m/s)	2.9 ± 0.3	3.0 ± 0.3	0.1 ± 0.1	1.9 (0.029)*
Zeitpunkt max. pos. Geschwindigkeit (ms)	-18.9 ± 9.9	-15.2 ± 8.3	3.8 ± 11.3	-19.8 (0.070)
Abfluggeschwindigkeit (m/s)	2.8 ± 0.3	2.9 ± 0.3	0.1 ± 0.2	3.4 (0.003)**
Abflugwinkel vorne/hinten (°)	-17.2 ± 7.5	-19.2 ± 8.1	-2.0 ± 7.9	11.4 (0.170)
Abflugwinkel links/rechts (°)	0.2 ± 3.3	-0.2 ± 3.6	-0.4 ± 4.4	-208.7 (0.580)
Max. Flexion (°)				
Fuss	-25.6 ± 4.0	-26.8 ± 4.3	-1.1 ± 3.9	4.4 (0.108)
Knie	88.1 ± 9.4	95.6 ± 14.5	7.5 ± 11.9	8.6 (0.001)**
Hüfte	114.2 ± 15.6	123.5 ± 18.3	9.2 ± 14.6	8.1 (0.001)**
Schulter	-70.0 ± 16.5	-63.9 ± 22.0	6.1 ± 17.8	-8.7 (0.061)
Zeitpunkt max. Flexion (ms)				
Fuss	-286.0 ± 59.3	-325.7 ± 94.9	-39.6 ± 101.4	13.9 (0.035)
Knie	-288.6 ± 75.9	-341.5 ± 89.7	-52.9 ± 83.5	18.3 (0.001)**
Hüfte	-367.3 ± 58.5	-385.4 ± 73.1	-18.1 ± 51.3	4.9 (0.054)
Schulter	-444.4 ± 62.2	-428.9 ± 64.1	15.5 ± 65.6	-3.5 (0.192)

Absprungwinkel (°)				
Fuss	38.3 ± 6.6	35.2 ± 8.3	-3.1 ± 9.5	-8.1 (0.074)
Knie	0.2 ± 6.5	3.3 ± 9.1	3.2 ± 10.1	2008.9 (0.085)
Hüfte	12.1 ± 8.1	13.8 ± 8.8	1.7 ± 9.1	13.8 (0.310)
Schulter	135.4 ± 22.3	142.5 ± 20.3	7.0 ± 27.9	5.2 (0.164)
Max. Winkelgeschwindigkeit exz. (m/s)				
Fuss	-117.8 ± 65.8	-127.2 ± 84.4	-9.4 ± 66.1	8.0 (0.427)
Knie	-247.6 ± 66.2	-264.1 ± 56.4	-16.6 ± 54.5	6.7 (0.097)
Hüfte	-295.8 ± 54.3	-336.4 ± 54.1	-40.6 ± 61.0	13.7 (< 0.001)***
Schulter	-462.5 ± 215.9	-578.4 ± 202.9	-115.9 ± 199.2	25.1 (0.002)**
Zeitpunkt max. Winkelgeschwindigkeit exz. (ms)				
Fuss	-554.4 ± 172.7	-642.3 ± 183.7	-87.9 ± 213.8	15.9 (0.027)*
Knie	-584.1 ± 175.6	-612.2 ± 163.2	-28.1 ± 138.8	4.8 (0.260)
Hüfte	-657.5 ± 170.5	-653.3 ± 158.1	4.3 ± 163.4	-0.6 (0.884)
Schulter	-616.8 ± 97.3	-627.6 ± 110.1	-10.8 ± 133.7	1.8 (0.651)
Max. Winkelgeschwindigkeit konz. (m/s)				
Fuss	1060.9 ± 141.3	1120.9 ± 156.6	59.9 ± 168.5	5.7 (0.053)
Knie	1022.6 ± 142.9	1054.7 ± 143.4	32.2 ± 69.5	3.1 (0.013)*
Hüfte	675.1 ± 85.9	710.8 ± 104.2	35.7 ± 79.6	5.3 (0.016)*
Schulter	877.5 ± 111.5	900.5 ± 150.5	23.0 ± 154.5	2.6 (0.407)
Zeitpunkt max. Winkelgeschwindigkeit konz. (ms)				
Fuss	-15.1 ± 6.6	-11.4 ± 6.5	3.7 ± 9.1	-24.6 (0.028)*
Knie	-13.0 ± 7.1	-10.2 ± 7.1	2.8 ± 9.4	-21.3 (0.104)
Hüfte	-14.0 ± 10.1	-11.9 ± 11.7	2.1 ± 9.4	-14.7 (0.225)
Schulter	-221.2 ± 56.4	-211.2 ± 63.2	10.0 ± 75.4	-4.5 (0.458)

*Anmerkung.* Von jedem der 32 Probanden wurde jeweils der beste CMJ-Sprung für die Analyse verwendet.  $M \pm SD$  = Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung. POST-PRE = Post-Werte minus Pre-Werte. Prozentuale Veränderung = Grössenveränderung der Parameter vom PRE zum POST in Prozent.  $p$  = Signifikanzwert. exz. = exzentrisch. konz. = konzentrisch. KSP = Körperschwerpunkt.

\* $p < 0.05$ . \*\* $p < 0.01$ . \*\*\* $p < 0.001$

Aus der Tabelle 3 wird ersichtlich, dass zwischen der Pre- und der Post-Messung die 32 Probanden im Durchschnitt eine signifikante ( $p < 0.001$ ) Sprunghöhenverbesserung von  $2.7 \pm 3.1$  cm (5.1 %) erreichen konnten. Die Frauen konnten dabei die Sprunghöhe im Schnitt um  $1.7 \pm 2.8$  cm (3.9 %) verbessern, während die Männer eine durchschnittliche Erhöhung von  $3.4 \pm 3.1$  cm (5.8 %) erzielten. Bei der Betrachtung aller 32 Probanden konnte nur die durch die Trainingsintervention verursachte Grössenveränderung der Abfluggeschwindigkeit der Hüfte

eine signifikante Korrelation ( $r = 0.37$ ,  $p = 0.036$ ) mit der Sprunghöhenveränderung aufweisen (siehe Tabelle 4). Die fünf grössten prozentualen signifikanten Grössenveränderungen zwischen der Pre- und der Post-Messung wurden bei der maximalen exzentrischen Winkelgeschwindigkeit der Schulter (+25.1 %), dem Zeitpunkt der maximalen konzentrischen Winkelgeschwindigkeit des Fusses (-24.6 %), dem Zeitpunkt der maximalen Flexion des Knies (+18.3 %), dem Zeitpunkt der maximalen exzentrischen Winkelgeschwindigkeit des Fusses (+15.9 %) und der tiefsten Ausholposition (+15.3 %) gefunden (siehe Tabelle 3). Eine Abnahme der Grösse bei den Zeitpunkten bedeutete, dass diese früher eintrafen als vorher. Weitere signifikante Grössenveränderungen wurden bei den Parametern maximaler exzentrischer Kraftwert, Anfangskraft, Abfluggeschwindigkeit und maximale Geschwindigkeit des KSP, Dauer der konzentrischen Phase, Gesamtdauer, Abfluggeschwindigkeit und maximale (negative und positive) Geschwindigkeit der Hüfte, maximale Flexion des Knies und der Hüfte, maximale exzentrische Winkelgeschwindigkeit der Hüfte sowie maximale konzentrische Winkelgeschwindigkeit des Knies und der Hüfte identifiziert.

Tabelle 4

*Korrelationen zwischen der Grössenveränderung der Sprunghöhe und der Grössenveränderung der biomechanischen Parameter vom PRE zum POST*

Parameter	Pre-to-Post-Analyse $r$ ( $p$ )
<b>Kinetische Parameter</b>	
Gewicht	-0.01 (0.942)
Absprunghöhe Impuls	-0.02 (0.933)
Dauer Anfang bis maximale Kraft	-0.06 (0.760)
Dauer maximale Kraft bis Absprung	-0.05 (0.765)
Maximale Kraft	0.04 (0.842)
Maximale relative Kraft	0.02 (0.909)
Maximale Kraft exz.	-0.11 (0.566)
Maximale Kraft konz.	0.00 (0.987)
Anfangskraft	-0.10 (0.587)
Abfluggeschwindigkeit des KSP	-0.01 (0.964)
Maximale Geschwindigkeit des KSP	0.01 (0.937)
Tieftste Position Ausholen	0.08 (0.664)
Maximale Leistung	0.21 (0.246)
Maximale relative Leistung	0.20 (0.281)

## Kinematische Parameter

---

Dauer exz. Phase	-0.11 (0.564)
Dauer konz. Phase	-0.01 (0.968)
Gesamtdauer	-0.11 (0.564)
Hüfte	
Max. neg. Geschwindigkeit.	0.15 (0.399)
Zeitpunkt max. neg. Geschwindigkeit	0.05 (0.773)
Max. pos. Geschwindigkeit	0.34 (0.059)
Zeitpunkt max. pos. Geschwindigkeit	0.19 (0.291)
Abfluggeschwindigkeit	0.37 (0.036)*
Abflugwinkel vorne/hinten	-0.03 (0.879)
Abflugwinkel links/rechts	0.12 (0.497)
Max. Flexion	
Fuss	0.18 (0.327)
Knie	-0.26 (0.146)
Hüfte	0.08 (0.673)
Schulter	0.11 (0.560)
Zeitpunkt max. Flexion	
Fuss	0.09 (0.610)
Knie	0.03 (0.859)
Hüfte	0.06 (0.743)
Schulter	0.10 (0.583)
Absprungwinkel	
Fuss	-0.12 (0.511)
Knie	0.21 (0.256)
Hüfte	0.07 (0.697)
Schulter	0.19 (0.310)
Max. Winkelgeschwindigkeit exz.	
Fuss	-0.16 (0.389)
Knie	-0.02 (0.902)
Hüfte	-0.07 (0.685)
Schulter	-0.09 (0.635)
Zeitpunkt max. Winkelgeschwindigkeit exz.	
Fuss	0.12 (0.507)
Knie	-0.07 (0.688)
Hüfte	0.04 (0.807)
Schulter	0.08 (0.669)



Max. Winkelgeschwindigkeit konz.

Fuss	0.02 (0.928)
Knie	-0.14 (0.444)
Hüfte	-0.06 (0.759)
Schulter	-0.17 (0.357)

Zeitpunkt max. Winkelgeschwindigkeit konz.

Fuss	0.14 (0.458)
Knie	0.20 (0.261)
Hüfte	0.13 (0.482)
Schulter	0.26 (0.157)

*Anmerkung.* Von jedem der 32 Probanden wurde jeweils der beste CMJ-Sprung für die Analyse verwendet. Pre-to-Post-Analyse = Korrelationen der Grössenveränderungen der Sprunghöhe mit den Grössenveränderungen der Parameter.  $r$  = Bravais-Pearson-Korrelationskoeffizient.  $p$  = Signifikanzwert. exz. = exzentrisch. konz. = konzentrisch. KSP = Körperschwerpunkt.

\* $p < 0.05$ . \*\* $p < 0.01$ . \*\*\* $p < 0.001$ .

### 3.1.3 Vergleich der besten mit den schlechtesten Springern.

**Pre.** Die Tabelle 5 zeigt, dass die zehn besten Springer eine durchschnittliche Sprunghöhe von  $62.5 \pm 3.3$  cm erreichten und die zehn schlechtesten  $40.7 \pm 2.2$  cm. Dies bedeutet eine um 53.6 % grössere Sprunghöhe der zehn besten im Vergleich zu den zehn schlechtesten Springern. Die fünf stärksten Grössenunterschiede der aufgezeichneten Parameter, die mit der Sprunghöhe eine signifikante Korrelation aufwiesen, waren der maximale Leistungswert (+77.7 %), der Absprungwinkel der Hüfte (-59.4 %), welcher in der Post-Analyse keine Signifikanz aufzeigte, die Anfangskraft (46.2 %), der maximale exzentrische Kraftwert (+45.8 %) und der maximale relative Leistungswert (+43.2 %).

Tabelle 5

*Die Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichungen der von den zehn besten und zehn schlechtesten Springern aufgezeichneten Parameter der PRE-Analyse, die eine signifikante Korrelation mit der Sprunghöhe im PRE oder POST aufzeigten*

Mit der Sprunghöhe signifikant korrelierende Parameter	10 beste Springer ( $62.5 \pm 3.3$ cm) ( $m = 10, w = 0$ ) $M \pm SD$	10 schlechteste Springer ( $40.7 \pm 2.2$ cm) ( $m = 0, w = 10$ ) $M \pm SD$	Prozentualer Grössenunterschied ( $p$ )
<b>Anthropometrische Parameter</b>			
Segmentlänge (cm)			
Oberschenkel	$42.8 \pm 3.8$	$40.3 \pm 1.8$	6.1 (0.078)
Unterschenkel	$45.1 \pm 2.6$	$41.2 \pm 2.8$	9.4 (0.005)**
Rumpf	$51.1 \pm 4.1$	$47.2 \pm 2.4$	8.2 (0.021)*

Oberarm	28.4 ± 1.5	27.0 ± 1.6	5.3 (0.054)
Unterarm	26.9 ± 1.0	23.4 ± 1.3	15.2 (< 0.001)***
Körpergrösse (cm)	183.6 ± 4.3	170.2 ± 5.3	7.9 (< 0.001)***
<b>Kinetische Parameter</b>			
Gewicht (kg)	79.8 ± 5.8	64.4 ± 5.9	23.9 (< 0.001)***
Absprunghöhe Impuls (cm)	16.3 ± 4.3	15.3 ± 1.8	6.9 (0.486)
Maximale Kraft (N)	1913.6 ± 206.1	1386.9 ± 169.2	38.0 (< 0.001)***
Maximale relative Kraft (N/kg)	24.0 ± 2.0	21.5 ± 1.5	11.5 (0.007)**
Maximale Kraft exz. (N)	1734.0 ± 242.9	1189.4 ± 285.3	45.8 (< 0.001)***
Maximale Kraft konz. (N)	1887.4 ± 219.1	1360.8 ± 168.4	38.7 (< 0.001)***
Anfangskraft (N)	1690.4 ± 222.2	1156.2 ± 255.0	46.2 (< 0.001)***
Abfluggeschwindigkeit des KSP (m/s)	2.9 ± 0.1	2.2 ± 0.1	30.3 (< 0.001)***
Maximale Geschwindigkeit des KSP (m/s)	3.0 ± 0.1	2.4 ± 0.1	27.2 (< 0.001)***
Tiefste Position Ausholen (cm)	-35.6 ± 5.9	-26.4 ± 4.4	35.2 (< 0.001)***
Maximale Leistung (W)	4680.2 ± 685.4	2634.1 ± 354.5	77.7 (< 0.001)***
Maximale relative Leistung (W/kg)	58.5 ± 6.8	40.9 ± 3.8	43.2 (< 0.001)***
<b>Kinematische Parameter</b>			
Hüfte			
Max. pos. Geschwindigkeit (m/s)	3.2 ± 0.2	2.6 ± 0.2	24.4 (< 0.001)***
Abfluggeschwindigkeit (m/s)	3.0 ± 0.2	2.5 ± 0.2	20.4 (< 0.001)***
Zeitpunkt max. Flexion (ms)			
Fuss	-282.3 ± 64.9	-280.5 ± 63.0	0.6 (0.951)
Knie	-272.3 ± 67.7	-311.0 ± 98.6	-12.4 (0.319)
Absprungwinkel (°)			
Knie	-3.6 ± 8.0	1.5 ± 5.8	-334.5 (0.116)
Hüfte	6.0 ± 7.9	14.6 ± 7.9	-59.4 (0.024)*
Max. Winkelgeschwindigkeit exz. (°/s)			
Hüfte	-312.1 ± 42.3	-265.1 ± 65.0	17.7 (0.071)
Zeitpunkt max. Winkelgeschwindigkeit exz. (ms)			
Fuss	-522.4 ± 139.5	-622.5 ± 191.0	-16.1 (0.197)
Knie	-539.0 ± 98.0	-623.0 ± 213.3	-13.5 (0.273)
Max. Winkelgeschwindigkeit konz. (°/s)			
Fuss	1109.6 ± 152.3	1015.1 ± 171.1	9.3 (0.209)
Knie	1072.5 ± 122.8	909.0 ± 128.3	18.0 (0.009)**
Hüfte	696.8 ± 71.7	614.6 ± 74.3	13.4 (0.021)*

Zeitpunkt max. Winkelgeschwindigkeit konz. (ms)

Schulter -238.1 ± 54.5 -206.5 ± 56.3 15.3 (0.218)

*Anmerkung.* Von jedem der 32 Probanden wurde jeweils der beste CMJ-Sprung für die Analyse verwendet.  $M \pm SD$  = Mittelwert ± Standardabweichung. Prozentualer Grössenunterschied = Prozentualer Grössenunterschied der zehn besten Springer in Bezug auf die zehn schlechtesten Springer.  $p$  = Signifikanzwert. exz. = exzentrisch. konz. = konzentrisch. KSP = Körperschwerpunkt.

\* $p < 0.05$ . \*\* $p < 0.01$ . \*\*\* $p < 0.001$

Beim geschlechtergetrennten Vergleich zeigten die fünf besten weiblichen Probanden die stärksten signifikanten Unterschiede in Bezug auf die fünf schlechtesten in den Parametern (ohne die Sprunghöhe) Zeitpunkt der maximalen konzentrischen Winkelgeschwindigkeit der Hüfte (-83.3 %), Zeitpunkt der maximalen positiven Geschwindigkeit der Hüfte (-67.5 %), Zeitpunkt der maximalen konzentrischen Winkelgeschwindigkeit des Knies (-65.4 %), maximale exzentrische Winkelgeschwindigkeit des Knies (55.8 %) und Zeitpunkt der maximalen konzentrischen Winkelgeschwindigkeit des Fusses (-41.4 %). Bei den Männern wurden die stärksten signifikanten Grössenunterschiede bei dem Absprungwinkel des Knies (-1030.0 %), dem Absprungwinkel der Hüfte (-70.7 %), dem maximalen Leistungswert (27.3 %), dem Zeitpunkt der maximalen negativen Geschwindigkeit der Hüfte (-21.8 %) und dem maximalen konzentrischen Kraftwert (21.5 %) gefunden.

**Post.** In der Post-Analyse sprangen die zehn Besten  $66.1 \pm 3.9$  cm und die zehn Schlechtesten  $42.7 \pm 3.0$  cm. Dies ist eine um 54.8 % grössere Sprunghöhe der zehn Besten im Vergleich zu den zehn Schlechtesten. Die fünf stärksten Grössenunterschiede der mit der Sprunghöhe korrelierenden Parameter wurden bei dem maximalen Leistungswert (+83.5 %), dem maximalen relativen Leistungswert (+47.4 %), dem maximalen exzentrischen Kraftwert (+43.8 %), der Anfangskraft (+42.8 %) und dem maximalen konzentrischen Kraftwert (+39.3 %), der bei der Pre-Analyse eine signifikante Veränderung von 38.7 % aufwies, entdeckt (siehe Tabelle 6).

Tabelle 6

*Die Mittelwerte ± Standardabweichungen der von den zehn besten und schlechtesten Springern aufgezeichneten Parameter der POST-Analyse, die eine signifikante Korrelation mit der Sprunghöhe im PRE oder POST aufzeigten*

Mit der Sprunghöhe signifikant korrelierende Parameter	10 beste Springer ( $66.1 \pm 3.9$ cm) (m = 10, w = 0) $M \pm SD$	10 schlechteste Springer ( $42.7 \pm 3.0$ cm) (m = 0, w = 10) $M \pm SD$	Prozentualer Grössenunterschied ( $p$ )
<b>Anthropometrische Parameter</b>			
Segmentlänge (cm)			
Oberschenkel	44.7 ± 2.3	42.3 ± 1.5	5.6 (0.015)*
Unterschenkel	45.0 ± 2.2	40.7 ± 1.3	10.5 (< 0.001)***

Rumpf	49.7 ± 2.3	46.0 ± 1.8	7.9 (< 0.001)***
Oberarm	27.3 ± 1.1	27.0 ± 1.5	1.4 (0.525)
Unterarm	26.7 ± 1.0	23.5 ± 0.6	13.7 (< 0.001)***
Körpergrösse (cm)	183.6 ± 4.3	170.7 ± 5.5	7.6 (< 0.001)***
<b>Kinetische Parameter</b>			
Gewicht (kg)	79.5 ± 4.6	64.0 ± 6.0	24.2 (< 0.001)***
Abprunghöhe Impuls (cm)	17.0 ± 2.4	14.7 ± 1.2	15.3 (0.015)*
Maximale Kraft (N)	1946.0 ± 186.5	1398.6 ± 174.9	39.1 (< 0.001)***
Maximale relative Kraft (N/kg)	24.5 ± 1.9	21.9 ± 2.8	11.5 (0.030)*
Maximale Kraft exz. (N)	1816.9 ± 308.2	1263.6 ± 260.8	43.8 (< 0.001)***
Maximale Kraft konz. (N)	1927.2 ± 180.4	1383.8 ± 171.1	39.3 (< 0.001)***
Anfangskraft (N)	1759.4 ± 261.7	1232.2 ± 270.3	42.8 (< 0.001)***
Abfluggeschwindigkeit des KSP (m/s)	3.0 ± 0.1	2.3 ± 0.2	31.2 (< 0.001)***
Maximale Geschwindigkeit des KSP (m/s)	3.1 ± 0.1	2.4 ± 0.1	28.6 (< 0.001)***
Tiefste Position Ausholen (cm)	-38.6 ± 7.0	-35.4 ± 7.0	9 (0.322)
Maximale Leistung (W)	4829.7 ± 464.0	2632.0 ± 356.2	83.5 (< 0.001)***
Maximale relative Leistung (W/kg)	60.7 ± 4.0	41.2 ± 4.7	47.4 (< 0.001)***
<b>Kinematische Parameter</b>			
Hüfte			
Maximale positive Geschwindigkeit (m/s)	3.3 ± 0.1	2.6 ± 0.2	24.8 (< 0.001)***
Abfluggeschwindigkeit (m/s)	3.2 ± 0.2	2.5 ± 0.2	25.2 (< 0.001)***
Zeitpunkt max. Flexion (ms)			
Fuss	-275.8 ± 70.1	-407.8 ± 97.8	-32.4 (0.003)**
Knie	-303.1 ± 79.5	-409.6 ± 83.6	-26.0 (0.009)**
Absprungwinkel (°)			
Knie	1.8 ± 10.2	6.8 ± 6.8	-73.1 (0.216)
Hüfte	12.1 ± 7.7	16.8 ± 10.5	-28.2 (0.263)
Max. Winkelgeschwindigkeit exz. (°/s)			
Hüfte	-331.2 ± 72.6	-318.7 ± 32.9	3.9 (0.627)
Zeitpunkt max. Winkelgeschwindigkeit exz. (ms)			
Fuss	-545.5 ± 147.4	-766.4 ± 180.7	-28.8 (0.008)**
Knie	-518.3 ± 113.3	-707.6 ± 195.8	-26.8 (0.016)*
Max. Winkelgeschwindigkeit konz. (°/s)			
Fuss	1223.2 ± 136.5	1036.7 ± 90.6	18.0 (0.002)**
Knie	1116.8 ± 102.9	921.8 ± 110.0	21.1 (< 0.001)***
Hüfte	737.3 ± 70.8	622.6 ± 83.9	18.4 (0.004)**

Zeitpunkt max. Winkelgeschwindigkeit konz. (ms)

Schulter

-198.2 ± 59.3

-232.9 ± 74.4

-14.9 (0.265)

*Anmerkung.* Von jedem der 32 Probanden wurde jeweils der beste CMJ-Sprung für die Analyse verwendet.  $M \pm SD$  = Mittelwert ± Standardabweichung. Prozentualer Grössenunterschied = Prozentualer Grössenunterschied der zehn besten Springer in Bezug auf die zehn schlechtesten Springer.  $p$  = Signifikanzwert. exz. = exzentrisch. konz. = konzentrisch. KSP = Körperschwerpunkt.

\* $p < 0.05$ . \*\* $p < 0.01$ . \*\*\* $p < 0.001$

Die stärksten signifikanten Grössenunterschiede (ohne die Sprunghöhe) der fünf besten Frauen in Bezug auf die fünf schlechtesten ergaben sich bei den Parametern Zeitpunkt der maximalen exzentrischen Winkelgeschwindigkeit der Hüfte (-37.2 %), Zeitpunkt der maximalen Flexion des Fusses (-33.5 %), Zeitpunkt der maximalen Flexion des Knies (-31.6 %), maximale konzentrische Winkelgeschwindigkeit des Knies (22.5 %) und maximaler relativer Kraftwert (15.7 %). Zu den stärksten Grössenunterschieden bei den Männern gehörten der Zeitpunkt der maximalen exzentrischen Winkelgeschwindigkeit des Fusses (-32.4 %), der Zeitpunkt der maximalen exzentrischen Winkelgeschwindigkeit des Knies (-30.3 %), der Zeitpunkt der maximalen negativen Geschwindigkeit der Hüfte (-27.2 %), der maximale konzentrische Kraftwert (15.5 %) und der maximale relative Leistungswert (15.0 %).

### 3.1.4 Bestes Modell und beste Einzelprädiktoren

Tabelle 7

*Die besten Modelle und Einzelprädiktoren der Sprunghöhe in der PRE- und POST-Messung*

	PRE		POST	
	Parameter $r(p)$	Prozentuale Voraussage der Sprunghöhenwerte (%)	Parameter $r(p)$	Prozentuale Voraussage der Sprunghöhenwerte (%)
Bester Einzelprädiktor	Maximaler relativer Leistungswert 0.89 (< 0.001)***	79.5	Maximaler relativer Leistungswert 0.89 (< 0.001)***	79.3
Bestes Zweiermodell	+ Tiefste Ausholposition -0.56 (< 0.001)***	88.0	+ Zeitpunkt der maximalen konzentrischen Winkel- geschwindigkeit des Fusses -0.10 (0.741)	82.7

Bestes Dreiermodell	+ Maximale exzentrische Winkelgeschwindigkeit des Fusses -0.21 (0.240)	91.8	+ Zeitpunkt der maximalen konzentrischen Winkelgeschwindigkeit des Knies 0.01 (0.405)	86.4
Zweitbesten Einzelprädiktoren	Maximaler Leistungswert 0.89 (< 0.001)***		Maximaler Leistungswert 0.89 (< 0.001)***	
Drittbesten Einzelprädiktoren	Maximaler Kraftwert 0.81 (< 0.001)*** + Maximaler konzentrischer Kraftwert 0.81 (< 0.001)***		Maximaler Kraftwert 0.76 (< 0.001)*** + Maximaler konzentrischer Kraftwert 0.76 (< 0.001)***	

Anmerkung. Von jedem der 32 Probanden wurde jeweils der beste CMJ-Sprung für die Analyse verwendet.  $r$  = Bravais-Pearson-Korrelationskoeffizient.  $p$  = Signifikanzwert.

\* $p < 0.05$ . \*\* $p < 0.01$ . \*\*\* $p < 0.001$ .

**Pre.** Die Resultate der multiplen Regressionsanalyse sind in der Tabelle 7 aufgelistet. Als bester Einzelprädiktor der Sprunghöhe wurde der maximale relative Leistungswert ( $r = 0.89$ ) gefunden. Dieser konnte alleine 79.5 % der Sprunghöhen voraussagen. Mit der Hinzunahme des Parameters tiefste Ausholposition konnte dieser Wert auf 88.0 % erhöht werden. Das beste Dreiermodell waren diese beiden Parameter mit der maximalen exzentrischen Winkelgeschwindigkeit des Fusses, welche 91.8 % der Sprunghöhenwerte voraussagen konnten. Der zweitbeste Einzelprädiktor war der maximale Leistungswert ( $r = 0.89$ ) und die drittbesten der maximale Kraftwert und der maximale konzentrische Kraftwert ( $r = 0.81$ ).

**Post.** Bei der Post-Messung galt ebenfalls der maximale relative Leistungswert ( $r = 0.89$ ) als bester Einzelprädiktor für die Sprunghöhe. Dieser konnte die Sprunghöhenwerte um 79.3 % voraussagen. Mit der Hinzufügung des Parameters Zeitpunkt der maximalen konzentrischen Winkelgeschwindigkeit des Fusses konnte dieser Wert auf 82.7 % gesteigert werden. Das beste Dreiermodell beinhaltete diese beiden Parameter mit dem Zeitpunkt der maximalen konzentrischen Winkelgeschwindigkeit des Knies, welche zusammen die Sprunghöhenwerte um 86.4 % vorhersagen konnten. Der zweitbeste Einzelprädiktor für die Sprunghöhe war der maximale Leistungswert ( $r = 0.89$ ) und die drittbesten der maximale Kraftwert und der maximale konzentrische Kraftwert ( $r = 0.76$ ; siehe Tabelle 7).

### 3.1.5 Korrelationen der biomechanischen Parameter ohne die Sprunghöhe.

**Pre.** Die für die Sprunghöhe relevanten signifikanten Korrelationen ( $r > 0.89$ ) wurden bei den Parametern maximaler Kraftwert und maximaler konzentrischer Kraftwert ( $r = 0.99$ ), maxi-

maler exzentrischer Kraftwert und Anfangskraft ( $r = 0.99$ ), maximaler konzentrischer Kraftwert und maximaler Leistungswert ( $r = 0.95$ ), maximaler Kraftwert und maximaler Leistungswert ( $r = 0.94$ ), Abfluggeschwindigkeit des KSP und maximaler relativer Leistungswert ( $r = 0.94$ ) sowie Gewicht und maximaler Kraftwert ( $r = 0.90$ ) gefunden. In 22 von 32 Fällen waren der maximale Kraftwert und der maximale konzentrische Kraftwert identisch. In den restlichen 10 Fällen lag der maximale Kraftwert durchschnittlich um 22.98 N höher als der maximale konzentrische Kraftwert. Der maximale exzentrische Kraftwert lag im Schnitt um 39.63 N über der Anfangskraft und betrug in 3 Fällen identische Werte.

**Post.** Zu den für die Sprunghöhe relevanten Korrelationen in der Post-Analyse gehörten die Parameter maximaler Kraftwert und maximaler konzentrischer Kraftwert ( $r = 0.99$ ), maximaler exzentrischer Kraftwert und Anfangskraft ( $r = 0.99$ ), Abfluggeschwindigkeit des KSP und maximaler relativer Leistungswert ( $r = 0.96$ ), Zeitpunkt der maximalen Flexion der Hüfte und Dauer der konzentrischen Phase ( $r = -0.95$ ), Abfluggeschwindigkeit des KSP und maximaler Leistungswert ( $r = 0.93$ ) wie auch Zeitpunkt der maximalen Flexion des Knies und Dauer der konzentrischen Phase ( $r = -0.91$ ). In 21 von 32 Fällen waren der maximale Kraftwert und der maximale konzentrische Kraftwert gleich. In den restlichen 11 Fällen lag der maximale Kraftwert um 20.52 N über dem maximalen konzentrischen Kraftwert. Der maximale exzentrische Kraftwert lag durchschnittlich um 41.60 N höher als die Anfangskraft und besass bei 3 Probanden identische Werte.

### **3.2 Intraindividuell**

26 von 32 Probanden konnten die Sprunghöhenwerte von der Pre- zur Post-Messung durchschnittlich um  $4.1 \pm 0.9$  cm verbessern.

#### **3.2.1 Korrelationen zwischen der Sprunghöhe und den biomechanischen Parametern.**

**Pre.** Die Tabelle 8 zeigt, dass die am häufigsten aufgetretenen signifikanten ( $p < 0.05$ ) Korrelationen ( $r > 0.49$ ,  $r < -0.49$ ) der biomechanischen Parameter mit der Sprunghöhe bei der maximalen Flexion der Hüfte (10/32), dem maximalen (relativen) Leistungswert (10/32), dem Absprungwinkel der Schulter (9/32), dem Gewicht (7/32), der Dauer der konzentrischen Phase (7/32), der maximalen negativen Geschwindigkeit der Hüfte (6/32), dem Absprungwinkel des Knies (6/32), dem maximalen exzentrischen Kraftwert (6/32) und der tiefsten Ausholposition (6/32) gefunden wurden. Alle anderen Korrelationen ( $r > 0.49$ ,  $r < -0.49$ ) der Parameter mit der Sprunghöhe traten bei weniger als 6 Probanden auf.

Tabelle 8

Anzahl des Auftretens von signifikanten Korrelationen der Parameter mit der Sprunghöhe des CMJ im PRE

Parameter	In wie vielen Fällen der beste Einzelprädiktor	In wie vielen Fällen signifikante Korrelation vorhanden ( $r > 0.49$ , $r < -0.49$ )
Maximale Geschwindigkeit des KSP	6	20
Abfluggeschwindigkeit des KSP	2	18
Hüfte: Maximale positive Geschwindigkeit	7	14
Hüfte: Maximale Flexion		10
Maximale (relative) Leistung		10
Schulter: Absprungwinkel	2	9
Hüfte: Abfluggeschwindigkeit	1	7
Gewicht	2	7
Dauer konz. Phase		7
Hüfte: Maximale negative Geschwindigkeit		6
Knie: Absprungwinkel		6
Maximale Kraft exz.	1	6
Tiefste Position Ausholen		6

Anmerkung. Es wurde die Anzahl der am häufigsten aufgetretenen signifikanten Korrelationen der biomechanischen Parameter mit der Sprunghöhe bei den 32 Probanden gezählt.  $r$  = Bravais-Pearson-Korrelationskoeffizient.  $p$  = Signifikanzwert. exz. = exzentrisch. konz. = konzentrisch. KSP = Körperschwerpunkt.

\* $p < 0.05$ . \*\* $p < 0.01$  \*\*\* $p < 0.001$ .

**Post.** In der Post-Analyse ergaben sich die am häufigsten aufgetretenen Korrelationen ( $r > 0.49$ ,  $r < -0.49$ ) der Parameter mit der Sprunghöhe bei dem maximalen (relativen) Leistungswert (9/32) und dem Absprungwinkel der Schulter (5/32). Alle restlichen Parameter zeigten in der Post-Analyse bei weniger als 5 Probanden eine Korrelation ( $r > 0.49$ ,  $r < -0.49$ ) mit der Sprunghöhe auf (siehe Tabelle 9).

Tabelle 9

Anzahl des Auftretens von signifikanten Korrelationen der Parameter mit der Sprunghöhe des CMJ im POST

Parameter	In wie vielen Fällen der beste Einzelprädiktor	In wie vielen Fällen signifikante Korrelation vorhanden ( $r > 0.49$ , $r < -0.49$ )
Maximale Geschwindigkeit des KSP	7	14
Hüfte: Maximale positive Geschwindigkeit	4	13
Abfluggeschwindigkeit des KSP	1	12
Hüfte: Abfluggeschwindigkeit	2	10
Maximale (relative) Leistung	2 (maximale Leistung)	9



Absprungwinkel der Schulter	4	5
Fuss: Absprungwinkel		4
Fuss: Zeitpunkt max. Winkelgeschw. konz.	1	4
Knie: Absprungwinkel	1	4
Knie: Zeitpunkt max. Winkelgeschw. konz.	1	4
Hüfte: Absprungwinkel		4
Schulter: Zeitpunkt max. Winkelgeschw. exz.		4

---

*Anmerkung.* Es wurde die Anzahl der am häufigsten aufgetretenen signifikanten Korrelationen der biomechanischen Parameter mit der Sprunghöhe bei den 32 Probanden gezählt.  $r$  = Bravais-Pearson-Korrelationskoeffizient.  $p$  = Signifikanzwert. exz. = exzentrisch. konz. = konzentrisch. KSP = Körperschwerpunkt.

\* $p < 0.05$ . \*\* $p < 0.01$  \*\*\* $p < 0.001$ .

### 3.2.2 Korrelationen der biomechanischen Parameter ohne die Sprunghöhe.

**Pre.** Die für die Sprunghöhe relevanten am häufigsten aufgetretenen ( $> 29/32$ ) signifikanten Korrelationen (ohne die Sprunghöhe) wurden bei den Parametern maximaler exzentrischer Kraftwert und Anfangskraft (32/32), maximaler relativer Kraftwert und maximaler konzentrischer Kraftwert (31/32), Absprungwinkel des Knies und Zeitpunkt der maximalen konzentrischen Winkelgeschwindigkeit des Fusses (31/32), Absprungwinkel des Knies und Zeitpunkt der maximalen konzentrischen Winkelgeschwindigkeit des Knies (31/32) sowie Abfluggeschwindigkeit und maximaler (relativer) Leistungswert (30/32) gefunden.

**Post.** In der Post-Analyse zeigten sich die für die Sprunghöhe relevanten meist auftretenden ( $> 29/32$ ) Korrelationen in den Parametern maximaler relativer Kraftwert und maximaler konzentrischer Kraftwert (31/32) sowie Abfluggeschwindigkeit des KSP und maximaler (relativer) Leistungswert (30/32).

**3.2.3 Vergleich zweier Probanden.** Beim Vergleich der aufgezeichneten Parameter von zwei Probanden (m; Proband 1 = 189 cm und 75.5 kg, Proband 2 = 180 cm und 76.4 kg) konnte festgestellt werden, dass beide nach der Trainingsintervention im Durchschnitt 5.6 bzw. 5.7 cm erhöhte Sprunghöhenwerte aufwiesen. Die signifikanten Korrelationen der Parameter mit der Sprunghöhe in der Post-Analyse waren bei Beiden jedoch nicht gleich. Nach den sechs Trainings wurden bei Proband 1 signifikante Korrelationen der Sprunghöhe mit den Parametern maximale exzentrische Winkelgeschwindigkeit des Knies, Absprunghöhe über den Impuls gemessen und Absprungwinkel der Schulter entdeckt. Bei Proband 2 waren es die maximale negative Geschwindigkeit der Hüfte, die maximale konzentrische Winkelgeschwindigkeit

keit des Fusses sowie deren Zeitpunkt, der Absprungwinkel des Knies, der Zeitpunkt der maximalen konzentrischen Winkelgeschwindigkeit des Knies und die maximale Flexion der Schulter. Somit konnten abgesehen von den Geschwindigkeitsparametern (maximale Geschwindigkeit des KSP wie auch maximale positive Geschwindigkeit und Abfluggeschwindigkeit der Hüfte) keine gleichen signifikanten Korrelationen gefunden werden.

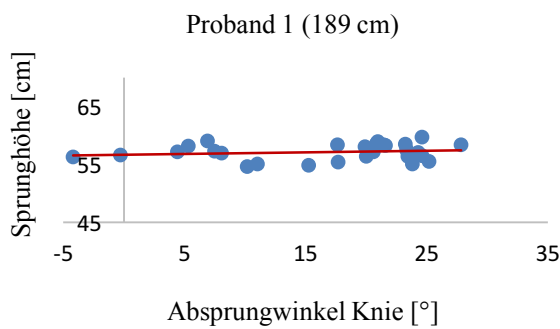


Abbildung 4. Aufgezeichnete Werte der Sprunghöhe und der Absprungwinkel des Knies beim CMJ in der Post-Messung bei Proband 1.

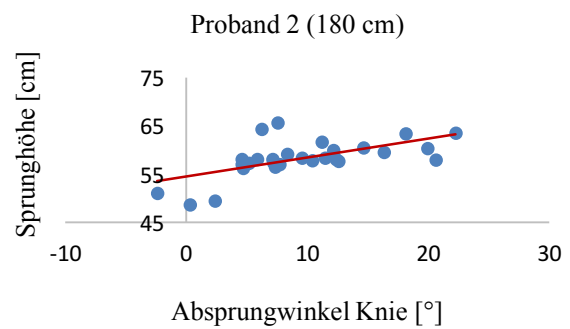


Abbildung 5. Aufgezeichnete Werte der Sprunghöhe und der Absprungwinkel des Knies beim CMJ in der Post-Messung bei Proband 2.

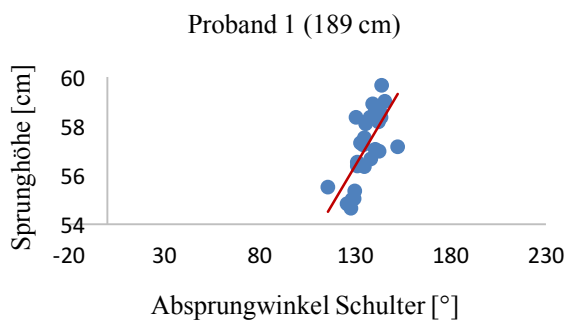


Abbildung 6. Aufgezeichnete Werte der Sprunghöhe und der Absprungwinkel der Schulter beim CMJ in der Post-Messung bei Proband 1.

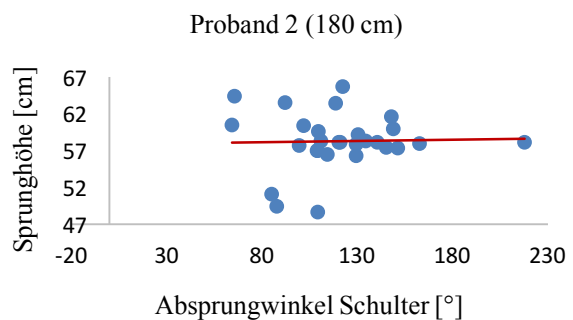


Abbildung 7. Aufgezeichnete Werte der Sprunghöhe und der Absprungwinkel der Schulter beim CMJ in der Post-Messung bei Proband 2.

Die Abbildungen 4 bis 7 zeigen die Unterschiede der Parameter Absprungwinkel des Knies und der Schulter in der Post-Messung zwischen den beiden Probanden. Es ist gut ersichtlich, dass bei Proband 2 der Absprungwinkel des Knies einen linearen Zusammenhang mit der Sprunghöhe aufweist und beim Proband 1 der Absprungwinkel der Schulter. Nur die Parameter Sprunghöhe, Segmentlängen, Zeitpunkt der maximalen negativen Geschwindigkeit der Hüfte, Abfluggeschwindigkeit der Hüfte, Zeitpunkt der maximalen exzentrischen Winkelgeschwindigkeit des Fusses und des Knies, Absprungwinkel der Hüfte, maximale Flexion der Schulter, Zeitpunkt der maximalen exzentrischen Winkelgeschwindigkeit der Schulter, ma-

ximale konzentrische Winkelgeschwindigkeit der Schulter, tiefste Ausholposition und Dauer der konzentrischen Phase zeigten zwischen den beiden Probanden keine signifikanten Unterschiede in der Post-Analyse auf. Alle restlichen Parameter unterschieden sich signifikant.

## 4 Diskussion

### 4.1 Interindividuell

#### 4.1.1 Korrelationen zwischen der Sprunghöhe und den biomechanischen Parametern.

Diese Studie zeigte, dass in der Pre-Analyse 24 Parameter eine signifikante Korrelation mit der Sprunghöhe aufwiesen und 26 in der Post-Analyse. Von den 24 Parametern konnten 5 in der Post-Analyse nicht identifiziert werden und umgekehrt 7 von 26 nicht in der Pre-Analyse (siehe Tabelle 1). Nur die Abfluggeschwindigkeit der Hüfte zeigte eine signifikante Korrelation mit der Sprunghöhe in der Pre-to-Post- wie auch in der Pre- und Post-Analyse auf. Dieser Parameter war der Einzige, der auf die Sprunghöhenveränderung einen Einfluss hatte (siehe Tabelle 4). Marshall und Moran (2015) zeigten in ihrer Studie, dass 6 Parameter, die in der Querschnittsstudie einen Zusammenhang mit der Sprunghöhe aufwiesen, in der Pre-to-Post-Analyse nicht identifiziert und umgekehrt 5 der Pre-to-Post-Analyse in der Querschnittsstudie nicht gefunden werden konnten. Diese Resultate legen dar, dass gefundene Parameter der Pre-Analyse nicht ausreichen, um leistungsbestimmende Parameter der Sprungkraft zu identifizieren. Durch das Techniktraining können die Parameter, die in der Pre-Analyse einen Einfluss auf die Sprunghöhe hatten, verändert werden und gegebenenfalls in der Post-Analyse keinen Zusammenhang mehr mit der CMJ-Leistung aufzeigen. Deswegen ist es für die Identifizierung von leistungsbestimmenden Parameter wichtig, eine Trainingsintervention einzubauen.

In der Pre- und Post-Analyse gemeinsam entdeckte signifikante Korrelationen mit der Sprunghöhe waren die Parameter Segmentlänge des Unterschenkels, des Rumpfes und des Unterarmes, Gewicht, Körpergrösse, maximaler (exzentrischer, konzentrischer und relativer) Kraftwert, Anfangskraft, Abfluggeschwindigkeit und maximale Geschwindigkeit des KSP, maximaler (relativer) Leistungswert, maximale positive Geschwindigkeit und Abfluggeschwindigkeit der Hüfte sowie maximale konzentrische Winkelgeschwindigkeit des Fusses, des Knies und der Hüfte (siehe Tabelle 1). Höhere Werte in diesen Parametern führte zu grösseren Sprunghöhenwerten. Aouadi et al. (2012) stellten ebenfalls fest, dass die Segmentlängen der unteren Extremitäten mit der Sprunghöhe korrelierten ( $r = 0.69$ ,  $p < 0.001$ ).

Die Resultate der geschlechtergetrennten Analyse zeigten jedoch, dass die Parameter Segmentlänge des Unterschenkels, des Rumpfes sowie des Unterarmes, Körpergrösse, Gewicht, maximaler exzentrischer Kraftwert und die maximale konzentrische Winkelgeschwindigkeit des Fusses wie auch der Hüfte weder bei den Frauen noch bei den Männern in der Pre- und Post-Analyse eine signifikante Korrelation mit der Sprunghöhe aufzeigten (siehe Tabelle 2). Warum diese Parameter bei der geschlechtergemischten Analyse einen signifikanten Zusam-

menhang mit der Sprunghöhe aufwiesen, kann dadurch begründet werden, dass die Männer meist höhere Werte in den Parametern Segmentlängen, Körpergrösse, Gewicht, Kraft und Geschwindigkeit aufwiesen als die Frauen. Die grösseren Sprunghöhenwerte wurden vor allem von den männlichen Probanden erzielt und somit zeigten die erwähnten Parameter bei besseren Sprunghöhen auch höhere Werte auf. Dies führte zu signifikanten Korrelationen dieser Parameter mit der Sprunghöhe.

Sowohl in der Pre- wie auch in der Post-Analyse stellten die maximale Geschwindigkeit und die Abfluggeschwindigkeit des KSP, die maximale positive Geschwindigkeit und die Abfluggeschwindigkeit der Hüfte, der maximale (relative) Leistungswert und der maximale (konzentrische) Kraftwert die stärksten Korrelationen mit der Sprunghöhe dar (siehe Tabelle 1). Auch Marshall und Moran (2015) fanden in ihrer Studie heraus, dass die maximale Geschwindigkeit des KSP und der maximale Leistungswert in der Pre- sowie in der Pre-to-Post-Analyse zu den stärksten Korrelationen mit der Sprunghöhe gehörten. Die maximale Geschwindigkeit des KSP betrug in der Pre-Analyse im Schnitt 0.15 m/s mehr als die Abfluggeschwindigkeit des KSP und in der Post-Analyse 0.14 m/s. Diese beiden Parameter sind also fast identisch und müssen nicht getrennt betrachtet werden. Das Gleiche gilt für die maximale positive Geschwindigkeit und die Abfluggeschwindigkeit der Hüfte. Die maximale positive Geschwindigkeit der Hüfte lag in der Pre-Analyse im Durchschnitt um 0.13 m/s über der Abfluggeschwindigkeit der Hüfte und in der Post-Analyse um 0.09 m/s. Die Geschwindigkeits-, Kraft- und Leistungsparameter scheinen den grössten Einfluss auf die Sprunghöhe zu haben. Bei höheren Geschwindigkeits-, Kraft- und Leistungswerten werden grössere Sprunghöhen erreicht. Die Geschwindigkeitsparameter zeigen jedoch deswegen die grössten Korrelationen mit der Sprunghöhe auf, da sich die Sprunghöhe mittels Abfluggeschwindigkeit und der Fallbeschleunigung  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$  berechnen lässt (Moir, 2008).

Laffaye et al. (2014) fanden in ihrer Studie heraus, dass es eine starke Korrelation zwischen den konzentrischen Kraftwerten und der Sprunghöhe gab, während die Zeitvariablen Gesamtdauer und Dauer der exzentrischen Phase leicht und negativ mit der Sprunghöhe korrelierten. Sie wiesen darauf hin, dass eine verbesserte Sprunghöhe durch eine Erhöhung der konzentrischen Kraftwerte und eine Minimierung der Dauer der exzentrischen Phase erzielt werden kann. In dieser Studie korrelierte der maximale konzentrische Kraftwert mit der Sprunghöhe in der Pre-Analyse mit  $r = 0.81$  ( $p < 0.001$ ) und in der Post-Analyse mit  $r = 0.76$  ( $p < 0.001$ ). Die Gesamtdauer und die Dauer der exzentrischen Phase korrelierte zwischen  $r = 0.04$  und  $r = 0.24$  in der Pre- und Post-Analyse, jedoch nicht signifikant (siehe Tabelle 1). Eine Erhöhung der konzentrischen Kraftwerte führte zu grösseren Sprunghöhen, jedoch scheint die Minimie-

rung der Zeit der exzentrischen Phase die Sprunghöhenwerte in dieser Studie nicht zu verbessern. Die geschlechtergetrennte Analyse deckte zusätzlich auf, dass der maximale konzentrische Kraftwert nur bei den Männern in der Pre-Analyse ( $r = 0.62$ ) einen signifikanten Zusammenhang mit der Sprunghöhe aufwies, während die Dauer der exzentrischen Phase weder bei den Frauen noch den Männern in der Pre- und Post-Analyse eine signifikante Korrelation aufzeigte (siehe Tabelle 2). Somit kann gesagt werden, dass die Dauer der exzentrischen Phase keinen entscheidenden Einfluss auf die CMJ-Leistung hatte und somit eine Veränderung in diesem Parameter nicht zu besseren Sprunghöhenwerten führte. Dies könnte jedoch auch daran liegen, dass es schwierig war, den Zeitpunkt des Bewegungsanfangs exakt zu bestimmen. Der maximale (relative, exzentrische und konzentrische) Kraftwert sowie die Anfangskraft zeigten nach der Trainingsintervention bei den Frauen und den Männern keine signifikante Korrelation mit der Sprunghöhe auf (siehe Tabelle 2). Dies kann dadurch begründet werden, dass sich die Probanden die Sprungausführung des CMJ in der Pre-Analyse nicht gewohnt waren und durch kleine Unterschiede in den Kraftparametern die Sprunghöhe beeinflussen konnten. Nach der Trainingsintervention wurde der CMJ effizienter ausgeführt und die Kraftparameter spielten eine weniger wichtige Rolle für die Sprunghöhe als andere Parameter.

Die Korrelation zwischen der tiefsten Ausholposition und der Sprunghöhe lag in der Pre-Analyse bei  $r = -0.56$  ( $p < 0.001$ ), was bedeutet, dass die Sprunghöhenwerte mit tieferer Ausholposition anstiegen. In der Post-Analyse betrug dieser Wert nur noch  $r = -0.26$  ( $p = 0.155$ ; siehe Tabelle 1). Die Studien von Mandic et al. (2015) und Mandic et al. (2016) zeigten, dass eine optimale Ausholtiefe existierte und die Sprunghöhenwerte bei grösserer und bevorzugter Ausholtiefe höher lagen. Kirby et al. (2011) zeigten ebenfalls, dass eine grössere Ausholtiefe in einer Zunahme der Sprunghöhe resultierte. Dies konnte mit dieser Studie nur in der Pre-Analyse gezeigt werden. Zusätzlich legten die Resultate der geschlechtergetrennten Analyse dar, dass es zwar signifikante Unterschiede der tiefsten Ausholposition zwischen den Frauen und den Männern gab, jedoch innerhalb der Geschlechter in der Pre- und Post-Analyse kein signifikanter Zusammenhang mit der Sprunghöhe entdeckt werden konnte. Die tiefste Ausholposition korrelierte möglicherweise deswegen nicht signifikant mit der Sprunghöhe, da die Probanden alle verschiedene Sportarten auf unterschiedlichem Niveau betreiben und andere maximale Kraftwerte sowie unterschiedliche prozentuale Anteile an Muskelfasertypen aufweisen. Es kann sein, dass ein Proband bei einer zu grossen Ausholtiefe die benötigte Kraft nicht aufbringen kann, um eine gute Sprunghöhe zu erreichen. Deswegen kann nicht gesagt werden, welche Ausholtiefe eingenommen werden muss, um eine maximal mögliche Sprunghöhe bei allen zu erreichen.

Gonzalez-Badillo und Marques (2010) fanden eine signifikante Korrelation ( $r = 0.812 - 0.851$ ) zwischen der Sprunghöhe und dem maximalen Leistungswert in der konzentrischen Phase. Dies ist mit dem maximalen Leistungswert (PRE und POST:  $r = 0.89$ ) in dieser Studie zu vergleichen (siehe Tabelle 1). Bei der geschlechtergetrennten Analyse zeigten jedoch nur die Männer bei der Pre- und Post-Analyse einen signifikanten Zusammenhang zwischen dem maximalen Leistungswert und der Sprunghöhe auf (siehe Tabelle 2). Warum der maximale Leistungswert nur bei den Männern einen Einfluss auf die Sprunghöhe hatte, könnte daran liegen, dass die männlichen Probanden eine andere Muskelarchitektur und grundsätzlich mehr Muskelmassen aufweisen als die weiblichen. Zusätzlich produzieren die Männer durch die grössere Abwärtsbewegung mehr Leistung als die Frauen, was mit einer grösseren Sprunghöhe resultiert.

Beim weiteren Vergleich zwischen den Frauen und Männern wies nur der maximale relative Leistungswert bei den weiblichen sowie bei den männlichen Probanden in der Pre- und der Post-Messung eine signifikante Korrelation (w: PRE = 0.59, POST = 0.66; m: PRE = 0.66, POST = 0.59) mit der Sprunghöhe auf. Der maximale relative Kraftwert wies auch eine signifikante Korrelation mit der Sprunghöhe bei den Frauen und Männern auf, jedoch nur in der Pre-Analyse. Alle anderen Korrelationen mit der Sprunghöhe zeigten sich in der Pre- und Post-Analyse bei den Frauen in anderen Parametern als bei den Männern (siehe Tabelle 2).

Dies deutet darauf hin, dass sich die zwischen den Geschlechtern für die Sprunghöhe entscheidenden Parameter unterscheiden. Der maximale (konzentrische) Kraftwert und die Anfangskraft beispielsweise scheint nur bei den Männern in der Pre-Analyse die Sprunghöhe zu beeinflussen. Frauen und Männer müssen wahrscheinlich unterschiedlich trainiert werden, um ihre Sprunghöhe zu maximieren.

Die Resultate der signifikanten Unterschiede der Parameter bei den Frauen und Männern in der Pre- und Post-Analyse ergaben, dass die männlichen Probanden im Schnitt signifikant grössere Sprunghöhen, längere Segmentlängen, grössere Körpergrössen, höhere Körpergewichte, tiefere Ausholpositionen sowie höhere Kraft-, Leistungs- und Geschwindigkeitswerte aufwiesen als die weiblichen. Die Resultate der Studie von Riggs und Sheppard (2009) zeigten, dass sich der maximale relative Kraft- und der maximale relative Leistungswert zwischen den Geschlechtern nicht signifikant unterschied. Dies konnte mit dieser Studie nicht bestätigt werden. Der maximale relative Kraftwert unterschied sich zwischen den Frauen und den Männern signifikant mit  $p = 0.014$  bzw.  $p = 0.030$  in der Pre- bzw. Post-Analyse und der maximale relative Leistungswert mit  $p < 0.001$  (PRE und POST; siehe Tabelle 2). Das bedeutet, dass selbst wenn die Leistung in Relation zum Körpergewicht betrachtet wird, die männlichen

Probanden höhere Leistungswerte aufweisen als die weiblichen. Frauen besitzen meist höhere prozentuale Körperfettanteile und weniger Muskelmasse im Vergleich zu den Männern. Der Körperfettanteil ist zusätzliches Gewicht, welches für die Produktion von Kraft und Leistung einen geringeren Anteil leistet als die Muskelmasse.

Bei den Frauen fanden Riggs und Sheppard (2009) die zwei grössten Korrelationen mit der Sprunghöhe bei dem relativen durchschnittlichen Leistungswert ( $r = 0.67$ ) und dem maximalen relativen Leistungswert ( $r = 0.66$ ). Bei den Männern waren es der maximale relative Leistungswert ( $r = 0.83$ ) und der maximale Leistungswert ( $r = 0.77$ ). In dieser Studie korrelierte der maximale relative Leistungswert der Frauen mit  $r = 0.59$ , bzw.  $r = 0.66$  (Pre- bzw. Post-Analyse), was mit der Studie von Riggs und Sheppard (2009) vergleichbar ist. Dieser Wert lag bei den Männern bei  $r = 0.66$ , bzw.  $r = 0.59$ . Der maximale Leistungswert betrug bei den männlichen Probanden  $r = 0.66$ , bzw.  $r = 0.51$ . In der Pre-Analyse wies bei den Frauen jedoch der Parameter maximale konzentrische Winkelgeschwindigkeit des Knies ( $r = 0.76$ ) und bei den Männern der maximale konzentrische Kraftwert ( $r = 0.62$ ) die stärksten signifikanten Korrelationen mit der Sprunghöhe auf. In der Post-Analyse betraf es bei den Frauen den Parameter Zeitpunkt der maximalen exzentrischen Winkelgeschwindigkeit der Hüfte ( $r = 0.78$ ) und bei den Männern der maximale relative Leistungswert (siehe Tabelle 2). Dies zeigt weiter auf, dass sich die auf die Sprunghöhe am stärksten beeinflussenden Parameter zwischen den beiden Geschlechtern unterscheidet.

Signifikante Unterschiede zwischen den männlichen und weiblichen Probanden fanden Riggs und Sheppard (2009) bei dem maximalen Kraftwert, der Sprunghöhe und dem maximalen Leistungswert. Diese Unterschiede konnten mit dieser Studie bestätigt werden. Die drei Parameter unterschieden sich in der Pre- und Post-Analyse zwischen den weiblichen und männlichen Probanden signifikant mit  $p < 0.001$  (siehe Tabelle 2). Die Männer wiesen deutlich höhere maximale Kraft- und Leistungswerte sowie Sprunghöhenwerte auf als die Frauen. Dies wird dadurch begründet, dass die Männer meist mehr Muskelmasse besitzen und damit höhere Werte in Kraft sowie Leistung und somit auch grössere Sprunghöhenwerte aufweisen können, als die Frauen.

Bei der Analyse der biomechanischen Parameter wurden in dieser Studie nur die linearen Korrelationen untersucht. Es kann gut sein, dass einige Parameter voneinander abhängen, jedoch nicht linear.

**4.1.2 Biomechanische Grössenveränderungen vom PRE zum POST.** Die 32 Probanden verbesserten die Sprunghöhe im Schnitt um  $2.7 \pm 3.1$  cm (+5.1 %). Darunter lag die Sprung-



höhenverbesserung bei den Frauen bei  $1.7 \pm 2.9$  cm (3.9 %) und bei den Männern bei  $3.4 \pm 3.1$  cm (5.8 %) (siehe Tabelle 2 und 3). Die Männer erzielten somit grössere Fortschritte in der Sprunghöhe als die Frauen. Die Studie von Marshall und Moran (2015), welche nur männliche Probanden untersuchte, zeigte nach einem achtwöchigen Dropjump-Training eine Sprunghöhenverbesserung von 6 %, was vergleichbar ist mit dieser Studie. Dies deutet daraufhin, dass bei einem Techniktraining, bei dem die Probanden selbstständig lernen, den CMJ effizienter durchzuführen, ähnliche Fortschritte erzielt werden können, wie bei einem Dropjump-Training. Dies kann jedoch auch daran liegen, dass die Probanden zwar alle sportlich, jedoch die meisten die CMJ nicht gewohnt waren und somit grosse Fortschritte machen konnten. Die signifikanten Grössenveränderungen von 19 Parametern zwischen der Pre- und der Post-Messung zeigen auf, dass es technisch trainierbare Parameter gibt (siehe Tabelle 3). Ausserdem dienen die Resultate der Sprunghöhenveränderungen der einzelnen Probanden von der Pre- zur Post-Analyse einer Verdeutlichung, dass bereits ein Techniktraining Fortschritte in den Sprunghöhenwerten erbringen kann. 26 von 32 Probanden konnten durch das Techniktraining die Sprunghöhenwerte von der Pre- zur Post-Messung durchschnittlich um  $4.1 \pm 0.9$  cm verbessern. Der maximale (relative und konzentrische) Kraftwert und der maximale (relative) Leistungswert zeigten keine nach der Trainingsintervention signifikanten Grössenunterschiede auf (siehe Tabelle 3). Diese Parameter können wahrscheinlich nicht nur durch ein drei- bis fünfwöchiges Techniktraining verbessert werden, sondern lassen sich erst längerfristig und durch spezifisches Sprungkrafttraining verändern.

**4.1.3 Vergleich der besten mit den schlechtesten Springern.** Beim Vergleich der zehn besten mit den zehn schlechtesten Springern legten der maximale exzentrische und konzentrische Kraftwert, die Anfangskraft und der maximale (relative) Leistungswert sowohl in der Pre- wie auch in der Post-Analyse grosse prozentuale Grössenunterschiede (zwischen 38.7 % und 83.5 %) der besten in Bezug auf die schlechtesten dar. Bei allen fünf Parametern lagen die Werte der zehn Besten höher als die der zehn Schlechtesten (siehe Tabellen 5 und 6). Weitere signifikante Grössenunterschiede zwischen den Besten und den Schlechtesten bei der Pre- und der Post-Messung waren die Parameter Segmentlänge des Unterschenkels, des Rumpfes und des Unterarmes, Gewicht, Körpergrösse, maximaler (relativer) Kraftwert, Abfluggeschwindigkeit und maximale Geschwindigkeit des KSP, maximale positive Geschwindigkeit und Abfluggeschwindigkeit der Hüfte sowie maximale konzentrische Winkelgeschwindigkeit des Knies und der Hüfte. Diese Grössenunterschiede liegen sehr wahrscheinlich daran, dass die zehn besten Springer nur aus Männern bestand und die schlechtesten alle weibliche Probanden wa-

ren. Die Männer besitzen meist höhere Kraft-, Leistungs- und Geschwindigkeitswerte wie auch höhere Werte in Segmentlängen, Gewicht und Körpergrösse als die Frauen. Deswegen wurden die Grössenunterschiede der fünf besten weiblichen bzw. männlichen Probanden in Bezug auf die fünf schlechtesten getrennt analysiert. Diese Resultate zeigten, dass bei den Frauen die stärksten signifikanten Grössenunterschiede der Besten im Vergleich zu den Schlechtesten vor allem in Geschwindigkeits- und Zeitparametern lag. Die Kraftparameter (maximaler (exzentrischer und konzentrischer) Kraftwert) zeigten zwischen den besten und schlechtesten weiblichen Probanden keine signifikanten Unterschiede auf. Bei den Männern stellte der maximale (relative und konzentrische) Kraftwert wie auch der maximale (relative) Leistungswert signifikante Unterschiede zwischen den Besten und den Schlechtesten in der Pre- und Post-Analyse dar, welche bei den Frauen nur beim maximalen relativen Kraftwert ebenfalls eine Signifikanz (PRE) aufzeigte. Wie bereits erwähnt, sind die für die Sprunghöhe entscheidenden Parameter für die weiblichen und männlichen Probanden unterschiedlich.

Floria et al. (2016) untersuchte die Unterschiede in kinetischen und kinematischen Parametern zwischen den 17 besten und den 17 schlechtesten männlichen Springern. Ihre Resultate zeigten, dass die besseren Springer eine grössere Ausholtiefe, eine grössere negative Geschwindigkeit, höhere exzentrische Kraftwerte, eine grössere positive Geschwindigkeit, höhere konzentrische Kraftwerte und eine grössere Absprunghöhe aufwiesen. Zusätzlich legten die Resultate von Cormie et al. (2009) dar, dass die besseren Springer grössere Werte in Leistung, Geschwindigkeit, Körperverschiebung und maximaler exzentrischer und konzentrischer Kraft aufzeigten. Diese Studie bestätigt ebenfalls, dass die Parameter maximaler (relativer) Leistungswert und maximaler konzentrischer Kraftwert signifikant grössere Werte der fünf besten im Vergleich zu den fünf schlechtesten männlichen Springern aufzeigten. Die höheren Leistungs- und Kraftwerte ermöglichten wohl eine grössere Sprunghöhe.

Für Trainer ist es wichtig, dass für Frauen und Männer unterschiedliche Trainingsschwerpunkte gesetzt werden, um die Sprunghöhe optimal zu verbessern.

**4.1.4 Bestes Modell und beste Einzelprädiktoren.** Die Resultate der multiplen Regression der Pre- und Post-Analyse zeigten als besten Einzelprädiktor der Sprunghöhe den maximalen relativen Leistungswert, welcher eine Korrelation mit der Sprunghöhe mit einem Wert von  $r = 0.89$  aufwies. Der zweitbeste Einzelprädiktor war der maximale Leistungswert ( $r = 0.89$ ) und die drittbesten der maximale Kraftwert und der maximale konzentrische Kraftwert (PRE:  $r = 0.81$ ; POST:  $r = 0.76$ ; siehe Tabelle 7).

Gonzalez-Badillo und Marques (2010) fanden in ihrer Studie den maximalen Leistungswert in der konzentrischen Phase als besten Sprunghöhenprädiktor, was die Resultate dieser Studie bestätigten, da die Korrelationen der besten und zweitbesten Einzelprädiktoren identisch waren. Dowling und Vamos (1993) zeigten ebenfalls als besten Einzelprädiktor der Sprunghöhe den maximalen positiven Leistungswert. Dies verdeutlicht, dass die Kraftparameter (maximaler (konzentrischer) Kraftwert) und die Leistungsparameter (maximaler (relativer) Leistungswert) einen bedeutenden Einfluss auf die Sprunghöhe haben. Erhöhungen in diesen Parametern führt zu einer Verbesserung der CMJ-Leistung. Jedoch ist uns bekannt, dass diese Parameter nicht bei allen Personen den gleichen Einfluss auf die Sprunghöhe haben.

**4.1.5 Korrelationen der biomechanischen Parameter ohne die Sprunghöhe.** Die starken Korrelationen zwischen dem maximalen Kraftwert und dem maximalen konzentrischen Kraftwert wie auch zwischen dem maximalen exzentrischen Kraftwert und der Anfangskraft liegen daran, dass der maximale Kraftwert am häufigsten in der konzentrischen Phase erreicht wurde und der Wert der Anfangskraft nur wenig unterhalb der maximalen exzentrischen Kraft lag und sich gleich wie die Anfangskraft verhielt. Die Korrelation zwischen dem Gewicht und dem maximalen Kraftwert kann dadurch begründet werden, dass die höheren Gewichte meist die Männer betrafen und diese auch höhere Kraftwerte aufbringen konnten als die leichteren, weiblichen Probanden. Erhöhte maximale (konzentrische) Kraftwerte führte zu grösseren maximalen Leistungswerten. Bei höheren Abfluggeschwindigkeiten des KSP wurden höhere maximale (relative) Leistungswerte erzielt. Je länger die Dauer der konzentrischen Phase andauerte, desto früher lag der Zeitpunkt der maximalen Flexion des Knies und der Hüfte.

## **4.2 Intraindividuell**

### **4.2.1 Korrelationen zwischen der Sprunghöhe und den biomechanischen Parametern.**

Die sowohl in der Pre- als auch Post-Analyse mindestens fünf Mal aufgetretenen signifikanten Korrelationen ( $r > 0.49$ ,  $r < -0.49$ ) mit der Sprunghöhe wurden nur bei dem maximalen (relativen) Leistungswert (PRE = 10; POST = 9) und dem Absprungwinkel der Schulter (PRE = 9; POST = 5) gefunden. Alle anderen Parameter zeigten entweder in der Pre- oder der Post-Messung in weniger als fünf Fällen eine signifikante Korrelation ( $r > 0.49$ ,  $r < -0.49$ ) auf (siehe Tabellen 8 und 9). Dies verdeutlicht, dass es keine Universalparameter gibt, die bei allen Probanden eine gute Korrelation mit der Sprunghöhe aufweisen. Die Parameter, die eine gute Korrelation mit der Sprunghöhe darlegten, variierten sehr stark innerhalb der Probanden. Es

war schwierig herauszufinden, wovon diese abhängen. Ein klares Muster konnte nicht erkannt werden.

**4.2.2 Vergleich zweier Probanden.** Der Vergleich zweier Probanden (m; Körpergrösse = 189 und 180 cm) verdeutlicht ebenfalls, dass es keine Universalparameter gibt, sondern die Parameter individuell sind. Beide konnten die Sprunghöhe im Schnitt um einen ähnlichen Wert verbessern, jedoch waren die signifikanten Korrelationen der Parameter mit der Sprunghöhe in der Post-Analyse nicht gleich. Abgesehen von den Geschwindigkeitsparametern (maximale Geschwindigkeit des KSP sowie maximale positive Geschwindigkeit und Abfluggeschwindigkeit der Hüfte) konnten keine gleichen signifikanten Korrelationen mit der Sprunghöhe in der Post-Analyse gefunden werden. Bei einem Probanden schien der Absprungwinkel des Knies einen linearen Zusammenhang aufzuweisen, während beim Anderen der Absprungwinkel der Schulter wichtig zu sein schien (siehe Abbildungen 4 bis 7). Deswegen kann keine allgemeine Aussage gemacht werden, bei wem welche Parameter es zu verändern gilt. Trainer müssen also die Trainings individuell an ihre Athleten anpassen, um bei allen die Sprunghöhe optimal zu fördern. Es kann kein Training durchgeführt werden, welches die Sprunghöhe bei allen optimal und gleichermassen verbessert.

#### **4.3 Fazit und Ausblick auf mögliche weiterführende Fragestellungen**

Es konnte herausgefunden werden, dass es für die Frauen und Männer unterschiedliche Parameter zu verändern gilt, um die Sprunghöhe zu verbessern. Weiter unterschieden sich die bei der intraindividuellen Analyse identifizierten Korrelationen der Parameter mit der Sprunghöhe stark zwischen den Probanden. Das bedeutet, dass sich die für die Sprunghöhe entscheidenden Parameter nicht nur zwischen den Frauen und den Männern unterschied, sondern auch innerhalb des gleichen Geschlechts. Dies weist darauf hin, dass es keine Universalparameter gibt, die für alle Probanden einen Einfluss auf die Sprunghöhe haben. Spannend wäre herauszufinden, wovon diese individuellen Parameter abhängen. Dies wäre für Trainer sehr nützlich, da sie somit das Training ihrer Athleten individuell anpassen und steuern könnten, um die Sprunghöhe bei allen zu maximieren.

## 5 Schlussfolgerung

Diese Arbeit untersuchte die inter- und intraindividuellen Leistungsunterschiede beim CMJ mit Armschwung in Bezug auf kinetische, kinematische und anthropometrische Parameter. Das Ziel war herauszufinden, welche Parameter für die Maximierung der Sprunghöhe entscheidend sind. Zusätzlich wurde die Frage gestellt, ob es Universalparameter gibt, die bei allen Probanden eine gute Korrelation mit der Sprunghöhe aufweisen oder ob diese individuell sind und falls ja, wovon diese abhängen könnten. Die Resultate der Studie zeigen auf, dass die Parameter Segmentlängen des Unterschenkels, des Rumpfes und des Unterarmes, Gewicht, Körpergrösse, maximaler (relativer, exzentrischer und konzentrischer) Kraftwert, Anfangskraft, Abfluggeschwindigkeit und maximale Geschwindigkeit des KSP, maximaler (relativer) Leistungswert, maximale positive Geschwindigkeit und Abfluggeschwindigkeit der Hüfte sowie die maximale konzentrische Winkelgeschwindigkeit des Fusses, des Knies und der Hüfte sowohl in der Pre- wie auch in der Post-Analyse signifikante Korrelationen mit der Sprunghöhe aufwiesen. Grössere Sprunghöhenwerte wurden mit erhöhten Werten in diesen Parametern erreicht. Als bester Einzelprädiktor der Sprunghöhe wurde sowohl in der Pre- wie auch in der Post-Analyse der maximale relative Leistungswert gefunden. Der zweitbeste Einzelprädiktor war der maximale Leistungswert und die drittbesten der maximale Kraftwert sowie der maximale konzentrische Kraftwert. Nur der maximale relative Kraftwert (PRE) und der maximale relative Leistungswert (PRE und POST) konnten sowohl bei den Frauen wie auch den Männern eine signifikante Korrelation mit der Sprunghöhe aufweisen. Die restlichen gefundenen Korrelationen der Parameter mit der Sprunghöhe unterschieden sich in den Parametern zwischen den weiblichen und männlichen Probanden der Pre- und der Post-Messung, was darauf hinweist, dass sich die auf die CMJ-Leistung beeinflussenden Parameter zwischen den Geschlechtern unterscheidet. Zusätzlich zeigte eine Analyse zweier Probanden auf, dass es abgesehen von den Geschwindigkeitsparametern (maximale Geschwindigkeit des KSP sowie maximale positive Geschwindigkeit und Abfluggeschwindigkeit der Hüfte) keine Parameter gab, die in der Post-Analyse für beide Probanden eine signifikante Korrelation mit der Sprunghöhe aufwiesen. Die intraindividuelle Analyse legte dar, dass die signifikanten Korrelationen der Parameter mit der Sprunghöhe innerhalb der Probanden stark variierten. Es konnte kein Muster entdeckt werden, wovon die mit der Sprunghöhe korrelierenden Parameter genau abhängen sollten. Somit wurde kein Universalparameter, der bei allen Probanden eine signifikante Korrelation mit der Sprunghöhe aufwies, gefunden. Dies weist darauf hin, dass Trainer nicht einfach ein Training machen und bei allen Athleten gleiche Fortschritte in

der Sprunghöhe erzielen können. Die Athleten sind individuell und brauchen unterschiedliche Trainingsschwerpunkte. Diese individuellen Unterschiede sollten die Trainer herausfinden, um die Sprunghöhe ihrer Athleten optimal zu fördern.

## Literatur

- Aouadi, R., Jlid, M. C., Khalifa, R., Hermassi, S., Chelly, M. S., Van Den Tillaar, R. & Gabbett, T. (2012). Association of anthropometric qualities with vertical jump performance in elite male volleyball players. *J Sports Med Phys Fitness*, 52(1), 11-17.
- Asmussen, E. & Bonde-Petersen, F. (1974). Storage of elastic energy in skeletal muscles in man. *Acta Physiol Scand*, 91(3), 385-392. doi:10.1111/j.1748-1716.1974.tb05693.x
- Barnes, J. L., Schilling, B. K., Falvo, M. J., Weiss, L. W., Creasy, A. K. & Fry, A. C. (2007). Relationship of jumping and agility performance in female volleyball athletes. *J Strength Cond Res*, 21(4), 1192-1196. doi:10.1519/R-22416.1
- Berthoin, S., Dupont, G., Mary, P. & Gerbeaux, M. (2001). Predicting sprint kinematic parameters from anaerobic field tests in physical education students. *J Strength Cond Res*, 15(1), 75-80.
- Bissas, A. & Havenetidis, K. (2008). The use of various strength-power tests as predictors of sprint running performance. *J Sports Med Phys Fit*, 48(1), 49-54.
- Bret, C., Rahmani, A., Dufour, A.-B., Messonnier, L. & Lacour, J.-R. (2002). Leg strength and stiffness as ability factors in 100m sprint running. *J Sports Med Phys Fitness*, 42(3), 274-281.
- Bobbert, M. F. & Casius, L. J. (2005). Is the effect of a countermovement on jump height due to active state development? *Med Sci Sports Exerc*, 37(3), 440-446.
- Bobbert, M. F., Gerritsen, K. G., Litjens, M. C. & Van Soest, A. J. (1996). Why is countermovement jump height greater than squat jump height? *Med Sci Sports Exerc*, 28(11), 1402-1412.
- Bobbert, M. F., Mackay, M., Schinkelshoek, D., Huijing, P. A. & van Ingen Schenau, G. J. (1986). Biomechanical analysis of drop and countermovement jumps. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 54(6), 566-573.
- Bosquet, L., Berryman, N. & Dupuy, O. (2009). A comparison of 2 optical timing systems designed to measure flight time and contact time during jumping and hopping. *J Strength Cond Res*, 23(9), 2660-2665. doi:10.1519/JSC.0b013e3181b1f4ff
- Caia, J., Weiss, L. W., Chiu, L. Z., Schilling, B. K., Paquette, M. R. & Relyea, G. E. (2016). Do Lower-Body Dimensions and Body Composition Explain Vertical Jump Ability? *J Strength Cond Res*, 30(11), 3073-3083. doi:10.1519/JSC.0000000000001406
- Carlock, J. M., Smith, S. L., Hartman, M.J., Morris, R. T., Ciroslan, D. A., Pierce, K. C. & Stone, M. H. (2004). The relationship between vertical jump power estimates and

- weightlifting ability: a field-test approach. *J Strength Cond Res*, 18(3), 534-539. doi:10.1519/R-13213.1
- Casartelli, N., Muller, R. & Maffiuletti, N. A. (2010). Validity and reliability of the Myotest accelerometric system for the assessment of vertical jump height. *J Strength Cond Res*, 24(11), 3186-3193. doi:10.1519/JSC.0b013e3181d8595c
- Chapman, A. E., Caldwell, G. E. & Selbie, W. S. (1985). Mechanical output following muscle stretch in forearm supination against inertial loads. *J Appl Physiol*, 59(1), 78-86.
- Cheng, K. B., Wang, C. H., Chen, H. C., Wu, C. D. & Chiu, H. T. (2008). The mechanisms that enable arm motion to enhance vertical jump performance-a simulation study. *J Biomech*, 41(9), 1847-1854. doi:10.1016/j.jbiomech.2008.04.004
- Cormie, P., McBride, J. M. & McCaulley, G. O. (2009). Power-time, force-time, and velocity-time curve analysis of the countermovement jump: impact of training. *J Strength Cond Res*, 23(1), 177-186. doi:10.1519/JSC.0b013e3181889324
- Countermovement Jump (CMJ). (o.D.). Zugriff unter <https://www.scienceforsport.com/countermovement-jump-cmj/>
- de Ruiter, C. J., Van Leeuwen, D., Heijblom, A., Bobbert, M. F. & de Haan, A. (2006). Fast unilateral isometric knee extension torque development and bilateral jump height. *Med Sci Sports Exerc*, 38(10), 1843-1852. doi:10.1249/01.mss.0000227644.14102.50
- Dias, J. A., Dal Pupo, J., Reis, D. C., Borges, L., Santos, S. G., Moro, A. R. & Borges, N. G., Jr. (2011). Validity of two methods for estimation of vertical jump height. *J Strength Cond Res*, 25(7), 2034-2039. doi:10.1519/JSC.0b013e3181e73f6e
- Dietz, V., Schmidtbleicher, D. & Noth, J. (1979). Neuronal mechanisms of human locomotion. *J Neurophysiol*, 42(5), 1212- 1222.
- Dowling, J. J. & Vamos, L. (1993). Identification of Kinetic and Temporal Factors Related to Vertical Jump Performance. *Journal of applied biomechanics*, 9(2), 95-110.
- Feltner, M. E., Frascetti, D. J. & Crisp, R. J. (1999). Upper extremity augmentation of lower extremity kinetics during countermovement vertical jumps. *J Sports Sci*, 17(6), 449-466. doi:10.1080/026404199365768
- Floria, P., Gomez-Landero, L. A., Suarez-Arrones, L. & Harrison, A. J. (2016). Kinetic and Kinematic Analysis for Assessing the Differences in Countermovement Jump Performance in Rugby Players. *J Strength Cond Res*, 30(9), 2533-2539. doi:10.1519/JSC.0000000000000502
- Frick, U., Schmidtbleicher, D. & Wörn, C. (1991). Vergleich biomechanischer Messverfahren zur Bestimmung der Sprunghöhe bei Vertikalsprüngen. *Leistungssport*, 2, 48-53.



- Fry, A. C., Ciroslan, D., Fry, M. D., LeRoux, C. D., Schilling, B. K. & Chiu, L. Z. F. (2006). Anthropometric and performance variables discriminating elite American Junior men weightlifters. *J Strength Cond Res*, 20(4), 861-866. doi:10.1519/R-18355.1
- Fukashiro, S. & Komi, P. V. (1987). Joint moment and mechanical power flow of the lower limb during vertical jump. *Int J Sports Med*, 8 Suppl 1, 15-21.
- Garcia-Lopez, J., Peleteiro, J., Rodriguez-Marroyo, J. A., Morante, J. C., Herrero, J. A. & Villa, J. G. (2005). The validation of a new method that measures contact and flight times during vertical jump. *Int J Sports Med*, 26(4), 294-302. doi:10.1055/s-2004-820962
- Gheller, R. G., Dal Pupo, J., Ache-Dias, J., Detanico, D., Padulo, J. & dos Santos, S. G. (2015). Effect of different knee starting angles on intersegmental coordination and performance in vertical jumps. *Hum Mov Sci*, 42, 71-80. doi:10.1016/j.humov.2015.04.010
- Gonzalez-Badillo, J. J. & Marques, M. C. (2010). Relationship between kinematic factors and countermovement jump height in trained track and field athletes. *J Strength Cond Res*, 24(12), 3443-3447. doi:10.1519/JSC.0b013e3181bac37d
- Harman, E. A., Rosenstein, M. T., Frykman, P. N. & Rosenstein, R. M. (1990). The effects of arms and countermovement on vertical jumping. *Med Sci Sports Exerc*, 22(6), 825-833.
- Hubley, C. L. & Wells, R. P. (1983). A work-energy approach to determine individual joint contributions to vertical jump performance. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 50(2), 247-254.
- Ishikawa, M. & Komi, P. V. (2008). Muscle fascicle and tendon behavior during human locomotion revisited. *Exerc Sport Sci Rev*, 36(4), 193-199. doi:10.1097/JES.0b013e3181878417
- Jansen, C. T. (2011). *Wissenschaftliche Gütekriterien bei sportmotorischen Tests: Reliabilität, Validität und Zusammenhangsmerkmale ausgewählter leistungsdiagnostischer Verfahren*. Hamburg: Diplomica-Verlag.
- Kenny, I. C., O. Caireallain, A. & Comyns, T. M. (2012). Validation of an electronic jump mat to assess stretch-shortening cycle function. *J Strength Cond Res*, 26(6), 1601-1608. doi:10.1519/JSC.0b013e318234ebb8
- Kirby, T. J., McBride, J. M., Haines, T. L. & Dayne, A. M. (2011). Relative net vertical impulse determines jumping performance. *J Appl Biomech*, 27(3), 207-214.

- Komi, P. V. & Bosco, C. (1978). Utilization of stored elastic energy in leg extensor muscles by men and women. *Med Sci Sports*, 10(4), 261-265.
- Kuhlow, A. (1980). Biomechanische Analyse und Ansteuerung konditioneller Komponenten bei Hochleistungsathleten. In R. Ballreich & A. Kuhlow (Hrsg.), *Beiträge zur Biomechanik des Sports* (S. 37-55). Schorndorf: Hofmann.
- Laffaye, G., Wagner, P. P. & Tombleson, T. I. (2014). Countermovement jump height: gender and sport-specific differences in the force-time variables. *J Strength Cond Res*, 28(4), 1096-1105. doi:10.1519/JSC.0b013e3182a1db03
- Linthorne, N. P. (2001). Analysis of standing vertical jumps using a force platform. *American Journal of Physics*, 69(11), 1198-1204.
- Mandic, R., Jakovljevic, S. & Jaric, S. (2015). Effects of countermovement depth on kinematic and kinetic patterns of maximum vertical jumps. *J Electromyogr Kinesiol*, 25(2), 265-272. doi:10.1016/j.jelekin.2014.11.001
- Mandic, R., Knezevic, O. M., Mirkov, D. M. & Jaric, S. (2016). Control strategy of maximum vertical jumps: The preferred countermovement depth may not be fully optimized for jump height. *J Hum Kinet*, 52, 85-94. doi:10.1515/hukin-2015-0196
- Marcora, S. & Miller, M. K. (2000). The effect of knee angle on the external validity of isometric measures of lower body neuromuscular function. *J Sports Sci*, 18(5), 313-319. doi:10.1080/026404100402377
- Markovic, G., Dizdar, D., Jukic, I. & Cardinale, M. (2004). Reliability and factorial validity of squat and countermovement jump tests. *J Strength Cond Res*, 18(3), 551-555. doi:10.1519/1533-4287(2004)18<551:RAFVOS>2.0.CO;2
- Marshall, B. M. & Moran, K. A. (2015). Biomechanical Factors Associated With Jump Height: A Comparison of Cross-Sectional and Pre-to-Posttraining Change Findings. *J Strength Cond Res*, 29(12), 3292-3299. doi:10.1519/JSC.0000000000001008
- McErlain-Naylor, S., King, M. & Pain, M. T. (2014). Determinants of countermovement jump performance: a kinetic and kinematic analysis. *J Sports Sci*, 32(19), 1805-1812. doi:10.1080/02640414.2014.924055
- McGuigan, M. R., Doyle, T. L., Newton, M., Edwards, D. J., Nimphius, S. & Newton, R. U. (2006). Eccentric utilization ratio: effect of sport and phase of training. *J Strength Cond Res*, 20(4), 992-995. doi:10.1519/R-19165.1
- McLellan, C. P., Lovell, D. I. & Gass, G. C. (2011). The role of rate of force development on vertical jump performance. *J Strength Cond Res*, 25(2), 379-385. doi:10.1519/JSC.0b013e3181be305c

- Microgate OptoGait - Was ist Optogait. (o.D.). Zugriff unter <http://www.optogait.com/Was-ist-Optogait>
- Moran, K. A. & Wallace, E. S. (2007). Eccentric loading and range of knee joint motion effects on performance enhancement in vertical jumping. *Hum Mov Sci*, 26(6), 824-840. doi:10.1016/j.humov.2007.05.001
- OR6-7.pdf. (o.D.). Zugriff unter <http://downloadcentral.interfaceforce.co.uk/downloads/OR6-7.pdf>
- Peterson, M. D., Alvar, B. A. & Rhea, M. R. (2006). The contribution of maximal force production to explosive movement among young collegiate athletes. *J Strength Cond Res*, 20(4), 867-873. doi:10.1519/R-18695.1
- Raffalt, P. C., Alkjaer, T. & Simonsen, E. B. (2016). Joint dynamics and intra-subject variability during countermovement jumps in children and adults. *J Biomech*, 49(13), 2968-2974. doi:10.1016/j.jbiomech.2016.07.010
- Riggs, M. P. & Sheppard, J. M. (2009). The relative importance of strength and power qualities to vertical jump height of elite beach volleyball players during the countermovement and squat jump. *Journal of Human Sport and Exercise*, 4(3), 221-236. doi:10.4100/jhse
- Rogan, S., Radlinger, L., Imhasly, C., Kneubuehler, A. & Hilfiker, R. (2015). Validity Study of a Jump Mat Compared to the Reference Standard Force Plate. *Asian J Sports Med*, 6(4), e25561. doi:10.5812/asjrm.25561
- Schwameder, H., Alt, W., Gollhofer, A. & Stein, T. (2013). Struktur sportlicher Bewegung – Sportbiomechanik. In A. Güllich & M. Krüger (Hrsg.), *Sport. Das Lehrbuch für das Sportstudium* (S. 125-169). Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag.
- Shetty, A. B. & Etnyre, B. R. (1989). Contribution of arm movement to the force components of a maximum vertical jump. *J Orthop Sports Phys Ther*, 11(5), 198-201.
- Sole, C. J. (2015). *Analysis of Countermovement Vertical Jump Force-Time Curve Phase Characteristics in Athletes* (Dissertation, East Tennessee State University, USA). Zugriff unter <http://dc.etsu.edu/etd/2549>
- Stone, M. H., Sands, W. A., Carlock, J., Callan, S., Dickie, D., Daigle, K., ... Hartman, M. (2004). The importance of isometric maximum strength and peak rate-of-force development in sprint cycling. *J Strength Cond Res*, 18(4), 878-884. doi:10.1519/14874.1
- Thompson, B. J., Ryan, E. D., Sobolewski, E. J., Smith, D. B., Akehi, K., Conchola, E. C. & Buckminster, T. (2013). Relationships between rapid isometric torque characteristics and vertical jump performance in division I collegiate American football players:

- influence of body mass normalization. *J Strength Cond Res*, 27(10), 2737-2742. doi:10.1519/JSC.0b013e318281637b
- Ugarkovic, D., Matavulj, D., Kukolj, M. & Jaric, S. (2002). Standard anthropometric, body composition, and strength variables as predictors of jumping performance in elite junior athletes. *J Strength Cond Res*, 16(2), 227-230.
- Van Ingen Schenau, G. (1984). An alternative view of the concept of utilisation of elastic energy in human movement. *Human Movement Science*, 3(4), 301-336. doi:10.1016/0167-9457(84)90013-7
- Vanezis, A. & Lees, A. (2005). A biomechanical analysis of good and poor performers of the vertical jump. *Ergonomics*, 48(11-14), 1594-1603. doi:10.1080/00140130500101262
- Vizcaya, F. J., Viana, O., del Olmo, M. F. & Acero, R. M. (2009). Could the Deep Squat Jump Predict Weightlifting Performance?. *J Strength Cond Res*, 23(3), 729-734. doi:10.1519/JSC.0b013e3181a04dc3
- Wank, V. & Heger, H. (2009). Sprünge. In A. Gollhofer & E. Müller (Hrsg.), *Handbuch Sportbiomechanik* (S. 214-245). Schorndorf: Hofmann.
- Wick, D. (2005). *Biomechanische Grundlagen sportlicher Bewegung*. Balingen: Spitta-Verl.
- Winter, D. A. (2009). *Biomechanics and motor control of human movement* (Fourth edition). Hoboken: Wiley.
- Wirth, K., Sander, A., Keiner, M. & Schmidtbleicher, D. (2012). Leistungsfähigkeit im Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus sportlich aktiver und inaktiver Kinder und Jugendlicher. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 62(11), 345-350.
- Young, W. (1995). Laboratory strength assessment of athletes. *New Studies in athletics*. 10(1), 89-96.